

II. 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）  
「人口減少社会における情報技術を活用した水質確保を含む管路網管理向上策に関する研究」  
分担研究報告書

送配水管における水質等の変化の予測及び実証

研究分担者 氏名：荒井康裕 所属：首都大学東京

研究要旨

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、個人宅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、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した。具体的には、重回帰分析を用いて個人宅残塩を推定するモデルを作成した。時間遅れを考慮した残塩消費幅に着目し、相関分析から影響要因を決定することで、高い精度のモデルを推定した。さらに、モデル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判断された。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における安全性が保たれることが明らかとなった。

A. 研究目的

管網末端で必要な残塩を維持するためには、送配水中の塩素の消費量を考慮し、浄水場における塩素の注入量を適切に管理する必要がある。本研究では、まず、K 浄水場残塩と個人宅残塩の相関分析を実施し、その時間遅れを検討する。次に、K 浄水場残塩と個人宅残塩の差を「残塩消費幅」と定義し、残塩の変動に影響を与えると考えられる水温や流量のデータとの相関分析を実施し、それら影響要因との時間遅れを明らかにする。そして、選択した影響要因を説明変数、残塩消費幅を目的変数とした重回帰モデルを推定する。最後に、推定モデルを用い、K 浄水場残塩の値が低下した場合に個人宅残塩にどの程度影響を及ぼすのかシミュレーションする。

B. 研究方法

本研究の対象は、図1に示す送配水ネットワークとした。以降の分析では、2地点の残留塩素濃度（K 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  $Q_1$  [m<sup>3</sup>/h]・S1 配水池配水流量  $Q_2$  [m<sup>3</sup>/h]・M 配水池-d 配水流量  $Q_3$  [m<sup>3</sup>/h]・M 配水池-o 配水流量  $Q_4$  [m<sup>3</sup>/h]）の計7種類の時間単位データを使用する。

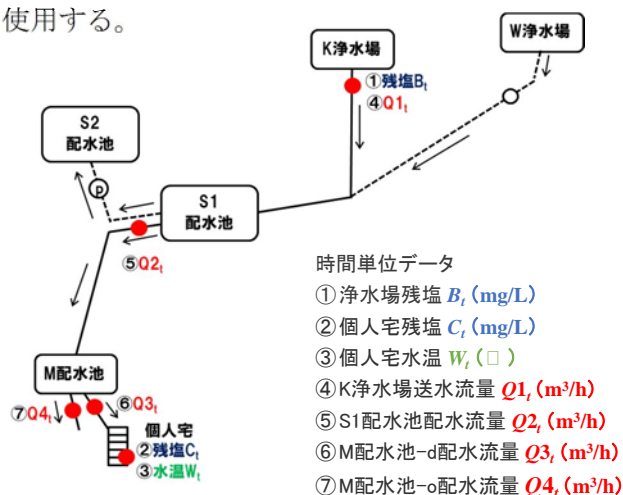


図1 対象とする送配水ネットワーク

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。

### C. 研究成果

#### (1) 相互相関分析による時間遅れの検討

残塩の消費量に焦点を当て、K浄水場残塩  $B_t$  と個人宅残塩  $C_t$  との差分を残塩消費幅  $D_t$  とし、モデルの目的変数に設定した。その際、K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、K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、それを用いて残塩消費幅を算出した。すなわち、夏期間は残塩消費幅  $D_t=B_{t-11}-C_t$ 、冬期間は  $D_t=B_{t-10}-C_t$  を目的変数としたモデルを以降で扱うこととなる。

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。

表1 残塩減少幅  $D_t$  と各要因との相互相関分析

要因	夏モデル		冬モデル	
	時間遅れ(h)	相互相関係数	時間遅れ(h)	相互相関係数
$B_t$	11	0.539	13	0.423
$W_t$	2	-0.382	0	0.669
$Q1_t$	5	-0.189	12	-0.242
$Q2_t$	14	0.140	12	-0.104
$Q3_t$	14	0.134	11	-0.214
$Q4_t$	7	-0.121	4	0.289

この結果を踏まえ、各要因について、同時点から同表に示す時間前までの値をモデルの説明変数に設定する。すなわち、K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(図2参照)。

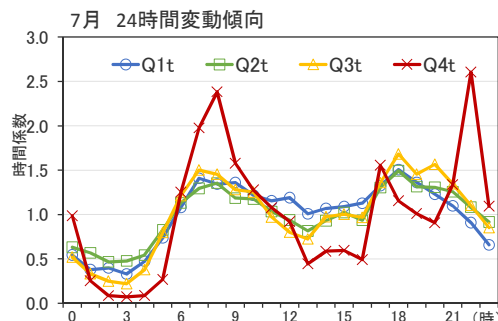


図2 流量の24時間変動パターン

これより、モデルの説明変数には  $Q1_t$ 、 $Q2_t$ 、 $Q3_t$  の内、最も相関係数の絶対値が大きい  $Q1_t$  を選択し、夏期間は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。

#### (2) 重回帰分析によるモデル化と検証

重回帰分析の結果、推定モデルは夏期間が式(1)、冬期間については式(2)である。 $R^*$ は自由度調整済み重相関係数を表す。

$$D_t = -0.431 - 0.171B_t - 3.55 \times 10^{-2}B_{t-1} + 0.159B_{t-2} - 8.64 \times 10^{-3}B_{t-3} - 4.89 \times 10^{-2}B_{t-4} - 3.04 \times 10^{-2}B_{t-5} - 1.05 \times 10^{-2}B_{t-6} + 6.80 \times 10^{-3}B_{t-7} - 1.14 \times 10^{-2}B_{t-8} + 0.122B_{t-9} + 0.128B_{t-10} + 0.730B_{t-11} + 3.91 \times 10^{-2}W_t - 1.65 \times 10^{-2}W_{t-1} - 1.03 \times 10^{-2}W_{t-2} - 1.40 \times 10^{-4}Q1_t - 3.96 \times 10^{-4}Q1_{t-1} - 5.51 \times 10^{-4}Q1_{t-2} - 1.76 \times 10^{-4}Q1_{t-3} - 4.70 \times 10^{-4}Q1_{t-4} - 2.88 \times 10^{-4}Q1_{t-5} \quad [R^* = 0.767]$$

…式(1)

$$D_t = 0.649 - 0.429B_t - 0.140B_{t-1} - 0.201B_{t-2} - 4.07 \times 10^{-2}B_{t-3} - 9.65 \times 10^{-2}B_{t-4} - 0.225B_{t-5} + 1.06 \times 10^{-3}B_{t-6} - 4.36 \times 10^{-2}B_{t-7} + 7.11 \times 10^{-2}B_{t-8} - 0.442B_{t-9} + 0.837B_{t-10} - 0.219B_{t-11} - 1.30 \times 10^{-2}B_{t-12} - 0.150B_{t-13} + 9.48 \times 10^{-3}W_t + 2.49 \times 10^{-5}Q1_t + 1.50 \times 10^{-4}Q1_{t-1} + 3.24 \times 10^{-5}Q1_{t-2} + 2.23 \times 10^{-5}Q1_{t-3} + 2.27 \times 10^{-4}Q1_{t-4} + 1.39 \times 10^{-4}Q1_{t-5} + 7.41 \times 10^{-5}Q1_{t-6} + 6.97 \times 10^{-5}Q1_{t-7} + 2.06 \times 10^{-4}Q1_{t-8} - 7.83 \times 10^{-4}Q1_{t-9} - 5.11 \times 10^{-6}Q1_{t-10} + 1.85 \times 10^{-4}Q1_{t-11} + 3.54 \times 10^{-4}Q1_{t-12} \quad [R^* = 0.818]$$

…式(2)

式中の青・緑・赤の四角は、K浄水場残塩  $B_t$ ・個人宅水温  $W_t$ ・送水流量  $Q1_t$ に関する項をそれぞれ表す。

モデルの精度を表2に、モデル化期間及び検証期間における時系列図を図3に示す。

表2 個人宅残塩の推定・検証精度  
(上：夏期間、下：冬期間)

(mg/L)	モデル化期間	検証期間
絶対平均誤差(A)	0.036	0.070
最大誤差(A)	0.080	0.200
絶対平均誤差(B)		0.036
最大誤差(B)		0.095

(mg/L)	モデル化期間	検証期間
絶対平均誤差(A)	0.009	0.035
最大誤差(A)	0.023	0.068
絶対平均誤差(B)		0.029
最大誤差(B)		0.068

※(A)は7日間、(B)は検証期間前半4日間の精度を表す

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。また、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。

### (3) 残塩の低下影響シミュレーション

モデル化期間において、K 浄水場残塩  $B_t$  の値が低下してしまっ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。 $B_t$  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、 $W_t$  と  $Q_{1t}$  については、モデル化期間の実測値を用いた。また、安全を見込んだ個人宅での残塩 0.20mg/L にモデルの最大誤差を加えた値を感度分析における  $C_t$  の許容下限値と設定した。これらの条件下で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  $C_t$  の許容下限値を既に下回っており、K 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(図4参照)。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、個人宅での残塩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末端での影響が小さく、残塩管理における余裕があると判断できる。

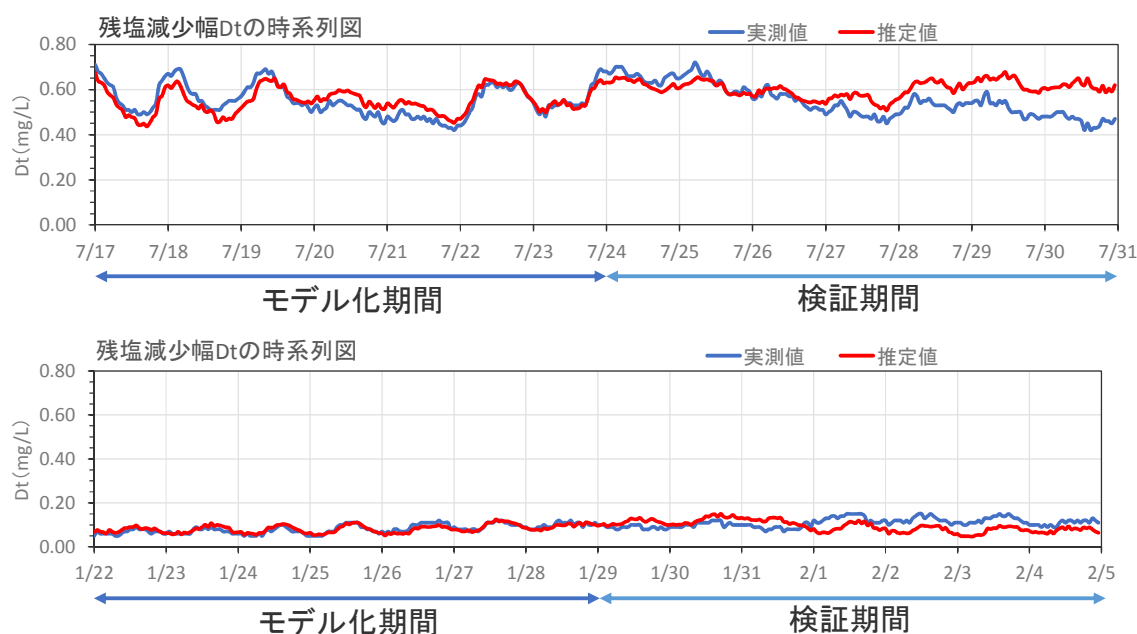


図3 モデル化期間及び検証期間における時系列図(上：夏期間、下：冬期間)

表3 感度分析の結果  
(上：夏期間、下：冬期間)

B <sub>t</sub> 濃度低下 (mg/L)	C <sub>t</sub> >0.28mg/L	
	B <sub>t</sub> (mg/L)	C <sub>t</sub> 最低値 (mg/L)
(現状)	0.85	0.26
-0.05	0.80	0.25
-0.10	0.75	0.24
-0.15	0.70	0.23
-0.20	0.65	0.22

B <sub>t</sub> 濃度低下 (mg/L)	C <sub>t</sub> >0.22mg/L	
	B <sub>t</sub> (mg/L)	C <sub>t</sub> 最低値 (mg/L)
(現状)	0.60	0.49
-0.05	0.55	0.38
-0.10	0.50	0.31
-0.15	0.45	0.21
-0.20	0.40	0.11

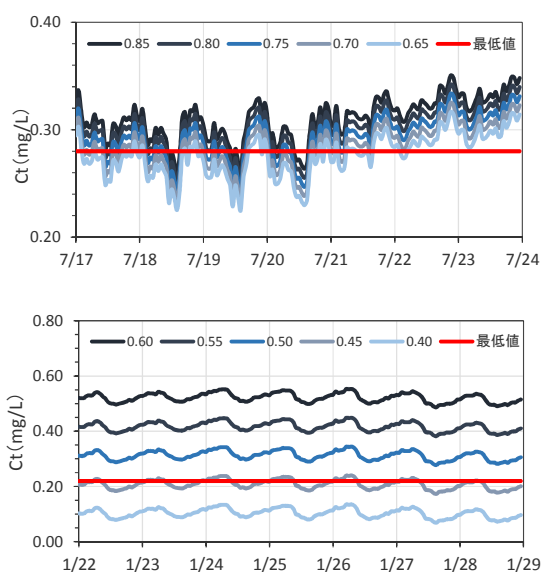


図3 残塩の低下影響シミュレーション  
(上：夏期間、下：冬期間)

#### D. 考察

##### (1) 相互相関分析による時間遅れの検討

・残塩消費幅  $D_t$  : K 浄水場から個人宅までの時間遅れが 24 時間以内となる範囲で相関係数(絶対値)が高いラグを調べた結果、K 浄水場残塩と個人宅残塩の間には、夏期間 11

時間、冬期間 10 時間の時間遅れが存在することが分かった。このことから、

夏期間 :  $D_t = B_{t-11} - C_t$  冬期間 :  $D_t = B_{t-10} - C_t$  と定義した。どちらの期間についても、K 浄水場残塩と個人宅残塩の相関は正であり、K 浄水場残塩が減少すると個人宅でも残塩が減少すると言える。

次に、モデルの説明変数の検討として、「残塩消費幅」と、残塩に影響を与えると考えられる 6 要因(「K 浄水場残塩」・「個人宅水温」・4 地点の流量データ)との相関分析を行った。K 浄水場残塩を除く 5 要因と残塩消費幅の相関については、相互相関係数の増減が 24 時間ごとに繰り返されており、自己相関の 24 時間周期の影響が表れていると考えられた。

・K 浄水場残塩との相関 : 夏、冬共に正の相関が強く、K 浄水場残塩が減少すると、残塩消費幅も減少する傾向にある。このことから、K 浄水場での塩素注入量が、K 浄水場から個人宅までの残塩消費分を考慮して管理されている様子を読み取ることができる。

・個人宅水温との相関 : 夏は負の相関、冬は正の相関と違いが見られる。また、冬は、時間遅れ 0 時間で相関が高くなっているのに対し、夏は 2 時間遅れで相関が高くなっており、冬に比べ、水温の変動の影響が長時間残りやすいといえる。

・流量との相関 :  $Q_{1t}$  については、夏、冬どちらも負の相関が確認できる。これは、流量が増加すると滞留時間が短くなり、残塩消費が減少するためであると考えられる。 $Q_{3t}$  については、夏は正の相関、冬は負の相関であることが確認できるが、コレログラムをみると、夏も負の相関が強くなる時間があることが読み取れる。

$Q_{2t}$  は、冬期間の相関コレログラムが夏期間に比べほとんど変動しておらず、相関係数の値が小さくなっている。これは、元のデータが、夏期間は 1 日 2 回のピークを持つ変動をしていたが、冬期間は変動がランダムになっていたことが要因として考えられる。

Q4<sub>i</sub>については、9月頃から配水量が2倍から3倍程度に増えていたため、夏期間は相関が弱いのに対し、冬期間は相関が強くなっている。

以上の結果から、各要因について、同時点から、24時間以内で最も相関の高くなる時間前までの値を説明変数に設定することとした。すなわち、「K浄水場残塩」については、夏期間は11時間遅れまで、冬期間は13時間遅れまでを選択した。「個人宅水温」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に設定した。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したところ、4地点の内、3地点で変動傾向が類似していた。このことから、モデルの説明変数には、3地点の中でも最も相関が高いK浄水場送水流量 $Q1_i$ を選択し、夏期間は5時間遅れまで、冬期間は12時間遅れまでを説明変数とした。

## (2) 重回帰分析によるモデル化と検証

選択した要因を用い、重回帰分析によって残塩消費幅を推定した。また、推定された残塩消費幅の値を用いて、個人宅残塩の値を算出した。その結果、夏・冬モデル共に、対象期間内の残塩消費幅と個人宅残塩の全体的な変動傾向を捉え、値を推定することができた。夏モデルと冬モデルの項を相対的に比較すると、夏期間は「水温」を、冬期間は「流量」を重視したモデルとなった。また、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が向上し、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個人宅残塩を推定できることが確認できた。

## (3) 残塩の低下影響シミュレーション

推定されたモデルを用いて、モデル化期間において、K浄水場残塩の値が低下した場合の個人宅残塩への影響を把握するため、感度分析を実施した。分析の結果、夏・冬のモデ

ルに共通してK浄水場で残塩が低下すると、個人宅の残塩の値が減少する傾向が確認できる。しかし、夏モデルでは、K浄水場で残塩を0.05mg/L低下させると、個人宅での残塩が0.01mg/L低下するのに対し、冬モデルでは、K浄水場で残塩を0.05mg/L低下させると、個人宅での残塩が0.1mg/L程度低下することから、夏に比べ、冬はK浄水場で残塩が低下した場合に個人宅残塩への影響大きいことが分かる。これは、K浄水場残塩 $B_i$ と残塩消費幅 $D_i$ の相関関係に要因があり、夏は両者の関係が正であったのに対し、冬は相関が負になっていたためである。すなわち、夏モデルでは、K浄水場残塩 $B_i$ が減少すると、残塩消費幅 $D_i$ が減少するが、冬モデルでは、K浄水場残塩 $B_i$ が減少すると、残塩消費幅 $D_i$ は増加するという関係に起因している。

前掲図3の時系列図をみると、冬モデルに比べ、夏モデルでは、個人宅残塩の値が一週間で大きく変動している様子が読み取れる。このことから、夏は冬に比べ、水温や流量といった外的要因の残塩消費への影響が大きいと考察される。

またK浄水場残塩 $B_i$ が低下した場合の個人宅残塩 $C_i$ の値の変動に着目すると、夏モデルでは、モデル化期間における個人宅残塩 $C_i$ の実測値の最低値が目標とする $C_i$ の最低値（図中の赤い線）を既に下回っており、K浄水場残塩 $B_i$ が現状以下になると、個人宅残塩 $C_i$ 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、K浄水場残塩 $B_i$ が現状から0.1mg/L減少して0.5mg/Lとなっても、個人宅での残塩を安全に保つことができると分かった。つまり、夏は個人宅での残塩の値を安全に管理していくために現状の管理水準を維持する必要があるのに対し、冬は残塩管理に余裕があるといえることができる。

8月上旬についても、本論で扱った7月下旬のモデルと同様にモデル化を試みたが、残塩の低減化シミュレーションが可能なモデル

の構築ができなかった。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、ディープラーニング等を用い、年間を通して残塩管理が可能なモデルを構築することも必要であると考え。それにより、小規模水道事業者での残塩管理のさらなる効率化を図ることが可能となる。

## **E. 結論**

本研究では、重回帰分析を用いて個人宅残塩の濃度を推定するモデルを作成した。時間遅れを考慮した残塩消費幅に着目し、相関分析から影響要因とそれらの時間遅れを決定することで、高い精度のモデルを推定することが出来た。さらに、モデル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。一方で、冬期間は現在より K 浄水場残塩が 0.1mg/L 低下しても、管網末端における安全性が保たれることが明らかとなった。

## **F. 研究発表**

### **1. 論文発表**

該当なし

### **2. 学会発表**

該当なし

## **G. 知的財産権の出願・登録状況**

### **1. 特許取得**

該当なし

### **2. 実用新案登録**

該当なし

### **3. その他**

該当なし