上水道の用途別月使用水量の時間的配分による 用途別日使用水量の推計

津田 守正¹・岩見 洋一²

¹正会員 国立研究開発法人土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター主任研究員

(〒305-8516 つくば市南原1-6)

E-mail:mori-tsuda@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人土木研究所水災害リスクマネジメント国際センター上席研究員

(〒305-8516 つくば市南原1-6)

E-mail:y-iwami@pwri.go.jp

渇水時の貯水池運用に資することを目的として、月単位で家庭用、業務用等に区分して集計されている上水道の用途別月調定水量から、用途別日使用水量を推計する手法を提案した。これまで経済データ等に適用されてきた、集計データを時間的に配分する手法を、調定水量の集計方法を踏まえて、上水道に拡張した。この手法を、愛媛県松山市に適用し、家庭用、業務用に区分して用途別日使用水量を推計し、給水制限時の水使用実態の把握のための有用性を検証した。提案した手法は、従来提案されている、日給水量に対して、調定水量から推計した用途比率を乗じることによる、用途別日使用水量の推計手法と比べて、日単位で調整される給水制限強度をより詳細に反映できる点や、結果の妥当性の検証が容易な点で優れていることを示した。

Key Words : temporal disaggregation, reservoir operation, water supply restriction

1. はじめに

渇水時の貯水池等の利水運用を考える上で、近年の家庭等における節水型機器の普及や、洗濯等における水の再利用など、水使用形態の変化を考慮することが重要になってきている。水使用形態の変化により、平常時の上水道の需要量が減少すると、貯水池からの補給量は少なくて済む。その結果、貯水池の貯水量は減りにくくなり、貯水量の低下時に、長期的な少雨に備えて補給量を抑制するために実施される、取水制限の頻度が低減する。

一方で、節水型機器の普及により、家庭における洗濯やトイレ等の1回あたりの使用水量が減少すると、渇水時にこれらの使用回数が抑制されたとしても、追加的に得られる節水量（以下、「追加節水量」と呼ぶ）が縮小する。また、普段から水の再利用が実施されると、渇水時に、追加的に水の再利用を実施する余地が縮小する^{1,2)}。そのため、減圧給水や時間給水といった、上水道の給水制限が実施されても、使用水量があまり抑制されず、小雨の長期化に備えるための、貯水量の温存がより困難になる可能性がある。

以上のことから、渇水時の貯水池運用を考えるうえで、家庭等の水使用形態の変化による、平常時の上水道の需要量や給水制限時の追加節水量の変化を、定量評価することが重要である。

これまで、上水道の給水量を対象に、給水制限時の追加節水量を定量評価する研究が行われている。たとえば、角ら³⁾は、給水制限未実施時の上水道の需要量を、重回帰分析により推計し、給水制限時の給水量と比較した。鈴木ら⁴⁾は、渇水に対する社会的関心の高揚により、上水道の給水量がどの程度抑制されるかを評価した。これらの研究は、上水道の給水量を対象に行われたが、上水道の給水量は、家庭や業務など様々な用途に利用され、給水量に占める各用途の比率は経年的に変化する。また、通常、渇水時には業務等の水使用よりも、家庭の水使用に対して優先的な配慮がなされる。よって、長期的な水資源計画の立案や、渇水時の貯水池の有効活用を考えるうえで、上水道の給水量を用途別に区分して解析することが重要である。特に家庭の水使用実態を把握することが、貯水池の有効活用を考える上でも有意義である。

我が国では、減圧給水や時間給水の強度は、降雨や水

源等の状況に応じて、日単位できめ細かく調整される。よって、貯水池運用への活用を見据えて給水制限時の水使用実態を把握するためには、日データが必要である。しかし、我が国では、上水道の日使用水量は、水道事業者において、用途別に集計されていない。水道料金を計算するために集計されている調定水量は、用途別に区分されているが月単位である。アメリカ、オーストラリアなど海外の渇水のように、給水制限が複数年間にまたがる場合には、月単位のデータでも解析が可能であると考えられる^{5,6)}が、我が国を対象にする場合には、より詳細なデータが求められる。また、国外においては、自治体レベルの給水量のデータだけでなく、家庭レベルの詳細な水道使用水量データを用いた解析も行われている^{6,7)}が、データの入手に課題があり、国内では同様の解析例は限られている。

このような、給水制限時の水使用実態の解析のための用途別日使用水量の要請に対して、筆者らは、月単位の調定水量を用いて、給水量に占める用途比率を月単位で推計し、日給水量に乗じることで、上水道の用途別日使用水量を推計する手法を提案してきた^{8,9)}。さらに、この手法で推計した家庭用日使用水量を用いて、給水制限による家庭の経済的被害を定量評価する手法を提案した^{10,11)}。その結果、近年の給水制限による経済的被害は、1990年代と同等であるものの、家庭の水使用形態の変化により、追加節水量が減少していることを示した。しかし、上述の用途別日使用水量の推計手法では、給水量に占める用途比率を求めるうえで、月単位の調定水量を用いるため、日単位で強度が調整される給水制限の影響を、精度良く把握することができないという課題があった。

一方、これまで、計量経済学の分野においては、年単位の集計データ等から、たとえば4か月ごとの値を推計するなど、集計データを用いて、高頻度の値を推計する時間的配分手法が提案されている^{12,13)}。これらの手法は、推計対象の系列と、関連する系列による回帰モデルを活用し、集計データと整合するように、高頻度の値を推計するものである。こうした手法は、筆者らの知る限り、これまで上水道の用途別日使用水量の推計には適用されていない。日データを用いた解析の必要性が高まる中で、こうした時間的配分手法を上水道に適用し、その有効性を確認することは、極めて有意義である。

ただし、本来、こうした手法は、時間的に単純集計されたデータを対象としているが、上水道の月単位の調定水量は、複雑な方法で集計されており、そのまま適用することが出来ない。たとえば、愛媛県松山市（旧松山市域）の場合、自治体を大きく2区分し、各区域の検針が1ヶ月毎に交互に行われる。つまり、上水道の利用者は2ヶ月に1度の頻度で使用水量が検針される。検針は各月の1日から25日頃までの間に、利用者毎に順次行われ、

各利用者は約2ヶ月前の前の検針日以降の使用水量が計測される。この合計値が調定水量として、用途別に月単位で集計される。時間的配分手法を適用する際には、こうした集計方法を考慮する必要がある。

本論文は、主として、Chow-Lin (1971)¹²⁾による、集計データの時間的配分手法を拡張し、月単位で集計された調定水量から、用途別日使用水量を推計する手法を提案する。この手法を愛媛県松山市の家庭用、業務用使用水量に適用し、給水制限時の水使用実態の把握のための有用性と、今後の課題について考察を行う。

2. 解析手法

(1) 集計データの時間的配分手法の概要

Chow-Lin (1971)¹²⁾により提案された、集計データの時間的配分手法の概要を説明する。まず、ベクトル y と、 p 種類の観測データ $X(x_1, x_2, \dots, x_p)$ が相関すると仮定する。 X とある時間間隔での y の集計値である y^* 、 y による y^* の集計方法を表現する集計行列 C 、 y を X で回帰した際の誤差項 u の分散行列 V をもとに、 y の最良線形不偏推計値 y_e を推計するものである。推計値 y_e は、集計行列 C により集計した場合に、 y^* と整合するように決定される。

データ数 n の集計系列 y^* をもとに、これを時間的に3分割したデータ数 $3n$ の未観測の系列 y を推計する場合を例に考える。なお、以降、「 $*$ 」は集計データを意味する。 p 種類のデータ $X(x_1, x_2, \dots, x_p)$ が観測されており、 y と X には、以下の関係があると仮定する。

$$y = X\beta + u \quad (1)$$

y は $3n \times 1$ のベクトル、 X は $3n \times p$ の行列である。誤差項 u は平均 0、分散行列 $V(3n \times 3n)$ の確率変数である。このとき、集計系列 y^* は、集計行列 $C(n \times 3n)$ と y により、(2) 式のように表される。

$$y^* = Cy \quad (2)$$

集計行列 C は以下の形である。

$$C = \begin{pmatrix} 111000000 & \cdots & 0 \\ 000111000 & \cdots & 0 \\ 000000111 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 000000000 & \cdots & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

詳細については省略するが、 y の推計値 y_e は、以下の(4)～(6)式により得られる。なお、「 $'$ 」は転置行列を表す。

$$y_e = X\beta + (V_z^* V^{*-1}) \bar{u}^* \quad (4)$$

ここで,

$$\hat{\beta} = (X^{*'} V^{*-1} X^*)^{-1} X^{*'} V^{*-1} y^* \quad (5)$$

$$\widehat{u}^* = y^* - X^* \hat{\beta} \quad (6)$$

なお, (4) 式, (5) 式中の, $V^* = CVC'$, $X^* = CX$, $V_Z^* = VC'$ である.

誤差項 u が相関係数 a の1階の系列相関を持つ場合, t 期, $t-1$ 期の u_t, u_{t-1} の関係は, 平均 0, 分散一定, 独立な確率変数 e_t により, (7)式で表される.

$$u_t = au_{t-1} + e_t \quad (7)$$

このとき, u の分散行列 V は以下の形になる.

$$V = \begin{pmatrix} 1 & a & a^2 & & a^{3n-1} \\ a & 1 & a & \cdots & a^{3n-2} \\ a^2 & a & 1 & & a^{3n-3} \\ \vdots & & & \ddots & \vdots \\ a^{3n-1} & \cdots & & & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

また, $V_Z^* V^{*-1}$ は, 以下で表される.

$$V_Z^* V^{*-1} = VC'(CVC')^{-1} \quad (9)$$

以上より, y^* , X , C , a が得られた場合, y_e を推計することができる.

(2) 用途別日使用水量への拡張

前節の手法を, 月単位で用途別に集計された上水道の調定水量から, 用途別日使用水量の推計に適用するには, 集計行列 C に対する拡張が必要である.

調定水量は, 個々の水道利用者に対する検針により得られた使用水量が, 月単位で集計されたものである. 検針間隔は自治体によって異なるが, 各水道利用者は, 使用水量の検針時に, 1ヶ月前または2ヶ月前等を実施された, 前回の検針からの使用水量が計測される. 各水道利用者の検針は, 日をずらして行われ, 各日の検針件数は異なる. こうした集計方法を踏まえて, 集計行列 C を表現する必要がある. なお, 前節の手法を適用するにあたって, 本論文では, 利用者ごとの水道使用水量の差違は無視し, 単一の平均的な水道利用者を想定する.

ある用途の利用者の t 日の使用水量を y_t とする. 検針サイクルが d 日であった場合, t 日の検針により計測される, d 日間の使用水量 y''_t は, (10)式により表される.

$$y''_t = \sum_{t-d}^{t-1} y_t \quad (10)$$

t 日に e_t 件の水道利用者に対する検針が行われており, m 月において, t_1 日から t_2 日までの検針により得られた使用水量が, 調定水量 y_m^* として集計されているとすると, y_m^* は, (11)式により表される.

$$y_m^* = \sum_{t_1}^{t_2} e_t y''_t \quad (11)$$

集計行列 C は, (10)式, (11)式で表される, 日単位の使用水量 y_t , 検針により得られる d 日間の使用水量 y''_t , 調定水量 y_m^* の関係を考慮して表す.

まず, (11)式で表される調定水量 y_m^* と, d 日間の使用水量 y''_t との関係を, 集計行列 C_1 で表現する. 行を調定水量, 列は検針日とし, 要素は検針日における検針件数 e_t を表す. 調定水量のデータ数が T_n あり, T_n に寄与する検針日数を T_d 日間とすると, C_1 は $T_n \times T_d$ の行列である.

次に, (10)式で表される, y''_t と t 日の使用水量 y_t の関係は, 集計行列 C_2 で表現する. 行は検針日, 列は水道の使用日を表す. T_d 日間の検針により, のべ T 日間の使用水量が計測されるとすると, C_2 は $T_d \times T$ の行列で表現される. 各検針日に対して, その検針により使用水量が計測される日を表現する.

集計行列 C は, これら, C_1 と C_2 の積, すなわち, $C = C_1 C_2$ で表現できる.

たとえば, ある地域に18件の水道利用者が存在し, それぞれ6日おきに水道使用水量が検針されている場合を考える. 18件の水道利用者が, 6日間のうち1日あたり, 2, 3, 4, 3, 4, 2件ずつ, 順番に検針が行われ, 6日間の使用水量が, 調定水量として集計されているとする(実際の調定水量は月単位の集計であるが, ここでは単純例として, 6日間毎に集計されているとする). 調定水量が3個ある場合, 集計行列 C_1 , C_2 , C は, それぞれ以下の, (12)式から(14)式のように表される.

$$C_1 = \begin{pmatrix} 23434200000000000000 \\ 000000234342000000 \\ 000000000000234342 \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$C_2 = \begin{pmatrix} 111111000000000000000000 \\ 011111100000000000000000 \\ 001111110000000000000000 \\ 000111111000000000000000 \\ 000011111100000000000000 \\ 000001111110000000000000 \\ 000000111111000000000000 \\ 000000011111100000000000 \\ 000000001111110000000000 \\ 000000000111111000000000 \\ 000000000011111100000000 \\ 000000000001111110000000 \\ 000000000000111111000000 \\ 000000000000011111100000 \\ 000000000000001111110000 \\ 000000000000000111111000 \\ 000000000000000011111100 \\ 000000000000000001111110 \\ 000000000000000000111111 \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$C = \begin{pmatrix} 2 & 5 & 9 & 12 & 16 & 18 & 16 & 13 & 9 & 6 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 5 & 9 & 12 & 16 & 18 & 16 & 13 & 9 & 6 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 5 & 9 & 12 & 16 & 18 & 16 & 13 & 9 & 6 & 2 \end{pmatrix} \quad (14)$$

3. 実地域への適用方法

(1) 対象地域の概要

愛媛県松山市の上水道は、取水量の約半分を石手川ダム、残り約半分を地下水から取水しており、渇水対応において、貯水池運用を考慮することが重要である。

解析は1991年4月から2003年4月までの期間を対象に行った。解析に用いた調定水量は、自治体より直接入手、あるいは統計書等の公表値を用いた。

解析期間中の上水道の給水制限の概要を、表-1に示す。1994年渇水時には、1994年7月11日から減圧給水が開始され、1995年5月1日まで継続された。このうち、7月26日から11月26日までの間は、水道の給水時間が制限される時間給水が実施され、最も厳しい期間には、1日の給水時間が5時間に制限された。2002年渇水時には、最も厳しい期間には、給水圧が50%に制限される減圧給水が実施され、時間給水は実施されなかった。

図-1に各月の調定件数、調定水量、1件1日当たり平均使用水量を示す。1件1日当たり平均使用水量は、調定水量を調定件数で割り算出した。当時、松山市の上水道は、家庭用、業務用、湯屋用に区分して集計されていたが、湯屋用については、家庭用、業務用と比べて件数、使用水量ともに少なく、上水道使用水量全体への寄与が小さいため、家庭用、業務用を対象に解析した。

図-1(a)の調定件数をみると、家庭用については、1991年は月あたり約14万件であったが、2003年には約19万件まで増えた。業務用については、1991年は月あたり約13,000件であったが、2003年には約16,000件まで増えた。家庭用については、調定件数が月ごとに増減していることが見て取れる。1991年の調定件数は、偶数月の方が奇数月よりも約3,500件多く、2003年には約7,600件多かった。統計値等による確認はできなかったが、各区域の世帯数の差によるものと推察される。

図-1(b)の調定水量をみると、月ごとの増減はあるものの、長期的に家庭用はおおむね横ばい、業務用は減少傾向にある。調定件数が増えていることとあわせると、1件当たりの使用水量が減少していることを反映していると考えられる。1994年の渇水時には、夏場に使用水量が大きく減少したことが確認できる。

図-1(c)の1件1日当たり平均使用水量をみると、家庭用については、1991年には約300リットルであったが、2003年には約240リットルまで減少した。業務用につい

ては、夏場と冬場の変動が大きいものの、1991年に約1,500リットル前後だったものが、2003年には約1,000リットル前後まで大きく減少した。これらは、節水型機器の普及や、水の再利用等の水使用形態の変化を反映していると考えられる。1994年渇水時に使用水量が大きく減少したことに比べると、2002年渇水時の使用水量の変化は顕著に確認できない。

表-1 解析期間中の主な給水制限

	給水制限期間	制限日数	最大制限内容
1994年渇水	1994年7月11日～ 1995年5月1日	295日	5時間給水
2002年渇水	2002年9月2日～ 2003年4月8日	219日	50%減圧給水

(a) 調定件数

(b) 調定水量

(c) 1件1日当たり平均使用水量

図-1 調定件数、調定水量、1件1日当たり平均使用水量

表-2 各期間の開始日，終了日

	開始日	終了日
前期	1991 年 4 月 1 日	1995 年 4 月 30 日
中期	1995 年 5 月 1 日	1999 年 3 月 31 日
後期	1999 年 4 月 1 日	2003 年 4 月 30 日

(2) 適用方法

解析は 1991 年 4 月から 2003 年 4 月までの期間を，前期，中期，後期の 3 期間に区分して行った．1994 年渇水までを前期，1994 年渇水後の数年間を中期，1999 年 4 月以降を後期とした．各期間の開始日，終了日を表-2 に示す．前期においては，水道の給水制限として，減圧給水と時間給水が実施され，後期は減圧給水が実施された．中期においては，給水制限は実施されていない．よって，主として，給水制限が行われた前期と後期を対象に，解析を行った．

上水道利用者の検針は，給水範囲を 2 区域に区分し，1 ヶ月毎に交互に，それぞれ 2 ヶ月に 1 度行われることから，奇数月と偶数月を分けて解析した．

t 日の用途別日使用水量 y_t は，給水制限強度（給水圧，給水時間）と年周期の変動を考慮して，(15) 式の回帰モデルで表現されると仮定した．用途別日使用水量 y_t は，家庭用，業務用に区分して解析した．

$$y_t = \beta_0 + \beta_1 \text{press}_t + \beta_2 \text{servt}_t + \beta_3 \sin(2\pi \text{day}_t/365) + \beta_4 \cos(2\pi \text{day}_t/365) + u_t \quad (15)$$

t 日の給水圧は press_t ，給水時間は servt_t ，年周期の変動は，右辺第 4，第 5 項により，年ごとの 1 月 1 日からの通し番号 day_t を用いて $\sin$ ， $\cos$ 関数で表現した． u_t は誤差項である．

集計行列 C_1 における月ごとの調定件数は，その月の 1 日から 25 日までの間で均等であると仮定し，月調定件数を 25 等分して与えた．なお，第 2 章第 2 節の (12) 式で示した， C_1 の例では，2，3，4，3，4，2 件と与えている．集計行列 C_2 により表される，各検針日ごとの使用水量の集計期間は，調定日の前日から，2 ヶ月前の調定日と同じ日までと仮定した．第 2 章第 2 節の (13) 式の C_2 の例では，6 日間ずつ 1 の値を入力している．

水道の給水圧 press_t ，給水時間 servt_t については，基本的に実績値を用いた．ただし，1994 年渇水時の 8 月 22 日から実施された 5 時間給水以降は，水道が使用できる時間帯の給水圧は，平常時と同程度に設定されたが，この期間においても，家庭における蛇口からの吐出量の調整や，水の再利用など，水道が減圧された時と同様の行動が取られたと考えられることから，同等の減圧が継続されたと仮定して計算を行った．

誤差項 u_t には，(7) 式に示す 1 階の系列相関を考慮し

た．すなわち， t 日の誤差 u_t と， $t-1$ 日の誤差 u_{t-1} の間に，相関係数 a の相関がある．なお，上水道の日データをを用いて重回帰分析を行った，Kenney et al. の検討²⁾では，日使用水量の回帰モデルにおいて，降水量，気温と，1 階のラグ変数を説明変数としている．より複雑な回帰技術を用いることで，厳密性を向上させることができるが，給水制限の効果を解析するうえでは許容可能と判断されている．こうした結果も踏まえて，本論文では 1 階の系列相関を考慮したが，これについては，さらなる改善の余地がある．

(15) 式のような回帰モデルを適用する場合，通常は決定係数等により，適合性が判断されるが，本手法で推計される用途別日使用水量には実測値がなく，実測値との比較による適合性の判断はできない．また，入力値として与えられる月単位の調定水量と整合するように，日単位の推計値が得られるため，調定水量との比較もできない．そこで，本論文では，推計した用途別日使用水量に対して，月単位の用途件数を乗じて合計することで，合計日使用水量を推計し，上水道の日給水量と比較することで，妥当性を判断することとした．日給水量には，無効水量等が含まれており，推計した合計日使用水量と，そのまま比較することは出来ないが，不自然な変動の有無等は判別できる．

誤差項の相関係数 a については，家庭用，業務用ともに同じ値であると仮定した．まず， a をゼロとして，用途別日使用水量を推計し，各用途の件数を乗じて推計した日使用水量と，実績日給水量との偏差の 1 階の相関係数を，新しい a の推定値とした．この a を用いて同じ計算を行い， a の前ステップからの変化が 10^{-10} 未満に収束するまで繰り返し計算を行った．おおむね，2 回程度の繰り返しで収束した．

4. 結果および考察

(1) 松山市への適用結果

前章の手法を用いて，松山市の上水道の日使用水量を，家庭用，業務用に区分して推計した．また，推計した用途別日使用水量に対して，用途件数を乗じることで，合計日使用水量を推計した．

図-2 に，前期の用途別日使用水量の推計結果を示す．家庭用日使用水量の推計値は，偶数月の調定水量を用いて推計した場合と，奇数月を用いた場合ともに，ほぼ同じ傾向で増減しているが，業務用については，奇数月に比べて偶数月の方が少ない．偶数月と奇数月で差が生じた理由について，統計値等による解析はできなかったが，業務用にはオフィスや学校，官公庁等の様々な利用者が含まれており，これより生じる，区域ごとの業種形

図-2 用途別使用水量の推計結果

図-3 推計日使用水量と実績日給水量の比較

態の相違等が、原因の一つとなっている可能性がある。

図-3に前期の推計日使用水量と、上水道の実績日給水量をあわせて示す。推計日使用水量は、給水量よりも少なく、奇数月は平均で約93.0%，偶数月は約89.4%であったが、約1割程度の無効水量等を考慮すると、大きく過小評価しているとは考えられない。また、推計日使用水量は、給水量と同様の増減傾向を示している。特に、1994年7月11日以降の給水制限時には、奇数月、偶数月ともに、給水量と同様に変動している。以上のことから、本手法により、給水制限も含めて用途別日使用水量の変動が、概ね再現できていると考えられる。

図-4に、1991年度から1994年度、1999年度から2002年度の推計日使用水量を、年度別に比較した結果を示す。ここでは、奇数月、偶数月の解析結果を平均している。1994年度、2002年度の日使用水量が、階段状に変化しているのは、(15)式で示した回帰式により、給水制限強度の差が反映されているためである。1994年度、2002年度については、(15)式を用いて給水制限の有無による差

図-4 推計日使用水量の年度別の比較

を加算して推計した、給水制限未実施時の推計値についても示す。

図-4の1994年度、2002年度の推計値と、給水制限が未実施だった場合の推計値との差違により、1994年渇水時の給水制限による1件あたりの追加節水量は、家庭用は16.0 m^3 、業務用は138.0 m^3 、2002年渇水時は、家庭用は5.3 m^3 、業務用は22.3 m^3 と推計される。

図-1(c)に示したとおり、特に業務用については、1件あたりの使用水量が経年的に減少傾向にあったが、本論文の手法では、調定水量と整合するように、日使用水量が推計されるため、図-4(b)の1991年度、1992年度、1993年度の結果にみられるように、経年的な使用水量の減少傾向についても表現されている。よって、本手法は、節水型機器の普及等、水使用形態の変化による使用水量の長期的な変化についても反映することが可能である。

図-5に、給水制限強度別の使用水量を、1994年渇水時、2002年渇水時に分けて比較する。給水制限開始前の10日間の平均使用水量についてもあわせて示す。家庭用、業務用ともに、前期(1994年渇水時)と比べて、後期(2002年渇水時)のほうが給水制限開始前の使用水量が少なく、25%減圧、50%減圧時の使用水量も少ない。ただし、給水制限開始前の使用水量と50%減圧時の使用水量の差をみると、家庭用の1994年渇水時は0.026 m^3 /件日、2002年渇水時は0.029 m^3 /件日であり、ほとんど差はなかったもの

(a) 家庭用

(b) 業務用

図-5 給水制限強度別の使用水量の比較

の、業務用の1994年渇水時は0.262 m^3 /件日、2002年渇水時は0.175 m^3 /件日と、大きく減少していた。これより、業務用については、近年、給水制限による追加節水量が縮小した可能性がある。

(2) 従来手法との比較

図-6、図-7に、従来提案されている、調定水量から推計した月単位の用途比率を日給水量に対して乗じる方法⁸⁾⁹⁾で、用途別日使用水量を推計した結果(従来手法)と、本論文の手法による結果を比較する。図-6は前期の推計結果であり、実績日給水量とあわせて示している。図-7は、1994年度の用途別日使用水量である。

図-6 推計日使用水量と実績日給水量の比較
(従来手法との比較)

(a) 家庭用

(b) 業務用

図-7 用途別使用水量の推計結果(従来手法との比較)

図-8 給水制限強度別の使用水量
(1994年渇水時、従来手法との比較)

図-6 をみると、両手法とも、長期的には同様の変動傾向が表現されている。従来手法は給水量の日単位の増減を反映し、小刻みに増減している。実際の使用水量は、気温や降雨の有無等により増減するが、本論文では、こうした要因による日変動を考慮しておらず、今後の改善の余地がある。一方で、従来手法においても、各用途の日変動は、日給水量より表現しているため、用途間の日変動の違いは反映出来ない。

図-7 をみると、両手法とも、1994 年渇水時の推計値は、概ね同等であるが、従来手法は用途比率を月単位で推計しているため、給水制限時の日単位の用途比率の変化をとらえることができず、7 月 11 日以降の給水制限時の使用水量の変化が、本論文の手法に比べて緩やかとなっている。

図-8 に、1994 年渇水時の使用水量を、給水制限強度別に期間平均したものを示す。従来手法の場合、8 月 1 日から 8 月 21 日まで実施された、8 時間給水時の家庭用使用水量が、7 月 29 日から 7 月 31 日までの 12 時間給水時の使用水量よりも多く、不自然である。また、全体的に給水制限強度間の使用水量の差が少ない。本論文の手法の場合、給水制限開始前の 7 月 1 日から 10 日までの

家庭用使用水量は $0.344\text{m}^3/\text{件日}$ 、5 時間給水時は $0.232\text{m}^3/\text{件日}$ と、 $0.112\text{m}^3/\text{件日}$ の差があったが、従来手法の場合、給水制限開始前は $0.345\text{m}^3/\text{件日}$ 、5 時間給水時は $0.241\text{m}^3/\text{件日}$ であり、 $0.104\text{m}^3/\text{件日}$ の差しかない。このように、従来手法では、給水制限による追加節水量が、過小評価される可能性がある。

また、従来手法は日変動を表現するために、日給水量を用いているが、本手法は、(15) 式の誤差項 u_t の系列相関係数 α を推定するために、日給水量を利用しているものの、日変動の再現には用いないため、解析により得られた結果の妥当性を確認するために、計測された日給水量と比較することが可能であり、結果の妥当性の確認が容易である点で優れている。

(3) 適用性の向上のための課題

本検討では、誤差項に対して、1 階の系列相関を考慮した。系列相関への移動平均・自己回帰過程の考慮等、適用性を向上させるための検討の余地がある。また、一般的に給水制限強度が強化されるほど、追加的に得られる節水量が小さくなると考えられることから、この効果を考慮するために、(15) 式の説明変数である、給水圧、給水時間等を対数化することによる、適用性の向上の可能性についても、検討が必要である。さらに、気温や降雨の有無による使用水量の日単位の増減をどのように考慮するかについても今後の課題である。

また、実測データを用いた適用性の検証も重要である。たとえば、配水区域内の大部分が家庭用として使用されている配水区の日配水量と、同区域の調定水量より推計した家庭用日使用水量を比較すること等も、一つの方法として考えられる。さらに、将来的に検針メータの性能向上等により、利用者毎の日使用水量等の詳細なデータが得られるようになった場合、本手法や従来手法の検証が容易になり、適用の幅が広がっていくものと考えられる。

本論文では、自治体レベルの集計値を用いて解析を行ったが、本手法は、地区レベル等の小規模データにも適用が可能である。これにより、渇水時の貯水池運用を見据えた水使用実態の把握だけでなく、例えば地区別の漏水量の把握等への活用も可能性として考えられる。こうした方向への適用の可能性についても検討が必要である。

5. おわりに

渇水時の貯水池運用に資することを目的として、月単位で家庭用、業務用等に区分して集計されている、上水道の用途別調定水量をもとに、用途別日使用水量を推計する手法を提案した。これまで、経済データ等に適用さ

れてきた、集計データを時間的に配分する手法を、上水道の調定水量の集計方法を踏まえて拡張した。この手法を、愛媛県松山市に適用し、家庭用、業務用の用途別に日使用水量を推計し、給水制限時の水使用実態の把握のための有用性を検証した。得られた主な結論は、以下のとおりである。

- 1) 提案した手法により推計した用途別日使用水量は、従来提案されている、日給水量に対して調定水量から推計した月単位の用途比率を乗じる手法と比べて、日単位の給水制限強度の変動を詳細に反映できる点や、日変動の推計に日給水量データを使用する必要がなく、結果の妥当性の検証が容易である点で優れている。
- 2) 計測された月調定水量と整合するように、日使用水量が推計されるため、節水型機器の普及等、水使用形態の変化による使用水量の経年変化についても反映される。
- 3) 対数データへの適用や、系列相関への移動平均・自己回帰過程の考慮、気温や降雨による日使用水量の増減の反映等、適用性を向上させるための改善の余地がある。

参考文献

- 1) 村川三郎, 西田勝, 北山広樹, 西名大作, 周南, 宮山博司: 福岡市の住宅団地 10 年間における水使用構造の比較, 日本建築学会計画系論文集, No.554, pp.47-53, 2002.
- 2) Kenney, D. S., R. A. Klein and M. P. Clark: Use and effectiveness of municipal water restrictions during drought in Colorado, Journal of the American water resources association, Vol.40, No.1, pp.77-87, 2004.
- 3) 角哲也, 柏井条介, 安達孝美: 渇水における給水制限と水使用量の関係, 土木技術資料, Vol.38, No.10, pp.38-43, 1996.
- 4) 鈴木健司, 岡田憲夫, 池淵周一: 渇水に対する社会的関心の活性度の指標化とその変動過程に関する考察—平成 6 年大渇水を事例として, 土木計画学研究・論文集, No.13, pp.369-380, 1996.
- 5) Renwick, M. E. and R. D. Green: Do residential water demand side management policies measure up? An analysis of eight California water agencies, Journal of environmental economics and management, Vol.40, pp.37-55, 2000.
- 6) Kenney, D. S., C. Goemans, R. Klein, J. Lowrey, and K. Reidy: Residential water demand management: Lessons from Aurora, Colorado, Journal of the American water resources association, Vol.44, No.1, pp.192-207, 2008.
- 7) Roibás, D., M. Á. García-Valiñas and A. Wall: Measuring welfare losses from interruption and pricing as responses to water shortages: An application to the case of Seville, Environmental and resource economics, Vol.38, pp.231-243, 2007.
- 8) 津田守正: 節水型機器普及による渇水被害軽減の可能性—香川県高松市を例として, 土木学会論文集G (環境), Vol.67, No.6, II_129-II_134, 2011.
- 9) 津田守正, 西田修三, 入江政安: 水道の需要抑制による渇水被害軽減効果の定量解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.68, No.4, I_1441-I_1446, 2012.
- 10) 津田守正, 西田修三, 入江政安: 家庭の水使用形態の変化を考慮した渇水被害の定量解析, 土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.69, No.4, I_1663-I_1668, 2013.
- 11) Tsuda, M., S. Nishida, M. Irie.: Quantification of the adverse effects of drought caused by water supply restrictions considering the changes in household water consumption characteristics, Water science & technology: Water supply, Vol.14, No.5, pp.743-750, 2014.
- 12) Chow, G.C., A. Lin: Best linear unbiased interpolation, distribution, and extrapolation of time series by related series, The review of economics and statistics, Vol.53, No. 4, pp.372-375, 1971.
- 13) Femández, R. B.: A methodological note on the estimation of time series, The review of economics and statistics, Vol.63, No. 3, pp.471-476, 1981.

(2015. 7. 27 受付)

Quantification of daily urban water consumption using temporal disaggregation technic

Morimasa TSUDA and Yoichi IWAMI

The volume of urban water used in Japan has been gradually declining in recent years because of the changes in water consumption characteristics (i.e., water saving appliances and behaviours). These changes affect the effect of water supply restrictions (supply hour restriction or pressure reduction) imposed by water suppliers for saving reservoir water during drought time. Intensity of water supply restrictions is changed on a daily basis, then daily water consumption data for each sector (i.e., household, commercial) are necessary for such analysis as effect of water supply restrictions, however those are not measured. In previous research, we estimated daily sectoral water consumption by distributing monthly measured sectoral water consumption referring daily urban water supply. We propose estimation method of daily sectoral water consumption using temporal disaggregation technic. This method is useful for water suppliers, because the method is simple and with easy data availability.