

都市における上水需要量の変動特性について

—需要の時間変動の分析—

DYNAMIC ANALYSIS OF HOURLY DEMAND IN
WATER SUPPLY SYSTEM

住 友 恒*

By Hisashi Sumitomo

1. はじめに

近年、上水道における管理技術の進歩に伴い、管理対象がより細部におよびうるようになり、ひいては上水の需要実態をより詳細に把握しておくことが重要になっている。実態調査としての需要分析にはいくつかの方法があるが、上水道の管理を前提にする以上観測可能な因子あるいは制御可能な因子を最初からある程度重視しておるのが工学的みてより効果的であろう。また、制御を前提にするときは一般に制御対象として諸現象の原因因子をとり上げることが多いので、発生した結果としての需要もさることながらそれを誘発した原因に注目し、その特性をくわしく把握しておくことが重要である。さて、原因と結果の相関特性を分析する場合、諸現象の非定常な状態に注目するのが一つの有力な方法で、筆者はこれまで上水需要の変動とその原因因子の相関分析を通じて需要特性を解明することを重視してきた¹⁾。ただ、需要誘発因子はきわめて数多く、各種変動の原因となる因子も多いので、すべてを同時に解明することはできない。したがって、典型的な変動を順次個々にとりあげ、段階を追って分析・解明し、制御の対象としてゆかざるをえない。前報¹⁾ではその第1段として、水道料金あるいは給水能力など給水事情の変化に伴う長期的な需要変動をとり上げ、その解析からこれまで言及されなかったいくつかの需要特性を明らかにした。同時に、この種の変動分析の目的、手法概念さらにはその効果についてもすでに検討を加えた。本文では需要の変動分析の一環として前報にひきつづき、需要の時間変動に注目してみる。このように需要の種類を限定すれば、需要に影響を与える諸因子のうち特に影響の強い因子とそうでない因子などそれぞれの場合に応じて整理され、また新たな需要特性が明らかになる。したがって、時間需要をとり上

げる場合、分析に先だち何がこの需要を支配する有意な原因因子であるかを十分考察しておく必要がある。

2. 上水の時間需要のモデル化とその分析

(1) 時間需要の特性

1人1人の需要が都市需要として集積された場合の時間需要の特性は、後に図-8に示すように夜間は需要が少なく、昼間は午前と午後にそれぞれピークを有する大きな変動に代表される。一見して定性的には上水需要が人間の生活行動に密接に関連することを想定しうる。ただ、1人1人の生活行動には大きな差があるので、ここでいう人間の生活行動とはそれらが集積した集団としての都市行動を指す。公共事業としての都市給水の最大の使命が集団としての社会への給水にある点を考慮すれば、人間の生活行動を上述のように都市行動としてとらえるのも十分妥当であろう。上水道による都市への一括給水が結果的に1人1人の生活を支えている事実はあくまで集団の内部調整によるものと考えればよい。そこで以下、都市行動と総需要量の相関に焦点を絞り、上水の時間需要の特性を分析してみる。ところで、人間行動と上水需要量の相関に関する調査としては、わが国では未

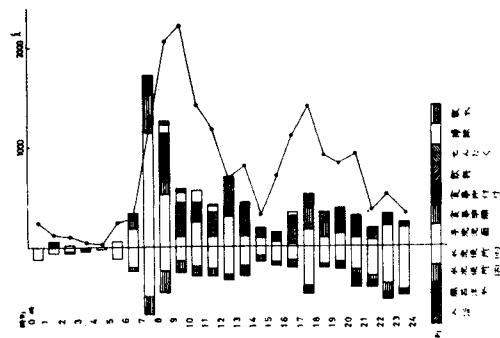


図-1 需要行動と需要水量

* 正会員 工博 京都大学助教授 工学部衛生工学教室

表-1 用途別単位水量⁴⁾

用 途	単位水量	使用回数	用 途	単位水量	使用回数
1. 手洗・洗面	9.6	10.2	7. 散 水	32.9	0.3
2. 食事準備	17.4	3.0	8. 風呂注水	142.4	0.5
3. 食事片付け	26.5	3.0	9. 入 浴	38.0	1.6
4. 飲 料	11.7	3.7	10. 水洗(大)	19.3	3.4
5. せんたく	126.0	0.8	11. 水洗(小)	14.8	11.6
6. そ う じ	35.6	0.8	単 位	I/回	回/日・栓

石・山田らによる研究^{2),3),4)}がある。表-1、図-1はその結果の一例を引用したもので、水需要が各種のミクロな生活行動に対応することが示されている。また、各種の水需要行動がある程度時刻によって決定づけられるとする点もここに興味深い。そこで上記研究をも参照しつつ、都市における時間需要の発生過程を次のように考えてみる。

まず、水需要行動発生の主要情報源を時刻とする。それぞれの人間が時刻を判断の基準としながら種々の行動をするものと一括表現する。ただ、情報をえればすぐに需要行動が始まるとは限らず、集団としては行動に分布が認められる。たとえばほぼ正午に昼食を始める生活のパターンとしている人も常に正午からただちに開始するとは限らず、一種の情報の蓄積が考えられる。また、需要行動に伴い結果として用水の需要が発生するものといえるが、各種の行動と需要水量の相関は未だ必ずしも定量的には明らかにされていない。現段階では行動の種類をある程度一括平均化して取り扱わざるをえないだろう。さらにまた、ある行動が需要を誘発する段階で、人々の水に対する価値観が需要量に影響するだろう。同一の行動があっても水に節約意識が働く場合とそうでない場合には発生する需要量に差が生ずるものと考えられ、ここでも同様の蓄積が考えられる。このように、変動に代表される時間需要の特性はいかに説明されるか、以下に整理しつつさらに検討を加えることにする。

(2) 時間需要のモデル化と考察

以上に述べた総括的な需要の発生過程は概念図を用いてさらに次のように説明される。図-2 のように人間集団に需要行動開始のインフォメーションとして時刻がインプットされる。その結果需要行動が発生し、ひいては需要を誘発してこれがアウトプットとなるという二段階を考える。一般にある種の情報インプットがある場合にこれが直接アウトプットに結びつくとは限らず、いわゆる情報の蓄積が考えられる。上記二段階を簡単に数式表示すれば次のように表わすことができよう。

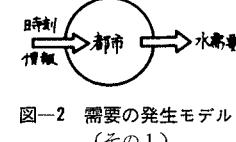


図-2 需要の発生モデル(その1)

トとなるという二段階を考える。一般にある種の情報インプットがある場合にこれが直接アウトプットに結びつくとは限らず、いわゆる情報の蓄積が考えられる。上記二段階を簡単に数式表示すれば次のように表わすことができよう。

$$I(t) = \alpha_1 \cdot B(t) + \alpha_2 \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$B(t) = \alpha_3 \cdot Q(t) + \alpha_4 \cdot \frac{dQ(t)}{dt} \quad \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 t は時刻、 $B(t)$ は時刻 t における需要行動量、 $I(t)$ は需要行動に対する時刻情報、 $Q(t)$ は誘発需要水量、各 α 値はそれぞれディメンジョンをもつ定数とする。ところで、式(1)に関する需要行動が時刻情報によっていかに発生するかについては現段階では定量化したい問題が多い。特に式(1)右辺第2項の行動の蓄積に関する項を取り上げるには、行動学上の分析が必要で多くの問題が残る。そこでとりあえず式(1)を考慮の上、 $B(t)$ をある所定の時間関数と想定して、その関数を式(2)の $B(t)$ にインプット量として導入すれば、総括的には需要の発生過程をより明確に説明することができる。つまり

図-3 に示すように、時刻 t に対応する行動の発生によって需要が誘発されるものと考える。以上から図-3 に示すような需要の発生を次のように数式モデルによって表現し、以下分析を加えればよい。

$$k \cdot B(t) = Q(t) + \frac{dQ(t)}{dt} \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここではひとまず式(2)の α_3 、 α_4 値を等値とみなして、 k にて一括表示している。上式より明らかなように、 k は情報が需要行動を通じて需要水量に転換される転換率で、広義にはある行動が需要を誘発する需要誘発率とみなしうる。従来の需要分析では、式(3)の右辺第2項を無視した $B(t)$ 、 $Q(t)$ の相関を時刻 t について平均化した上で、需要とその原因としての Q と B の相関を分析することが多い。このとき需要の転換率あるいは誘発率 k は需要原単位と呼ばれ、 B としてとり上げる因子によって各種の原単位が算定される。

なお、式(3)右辺の各項のもつディメンジョンからみて α_3 、 α_4 値を k 値にて一括する際に、時刻 t を無次元化していることがわかる。つまり1時間を単位としてあらゆる時刻、時間を以後その相対量として表わし、たとえば1時間15分は無次元量1.25と表わす。

さて、一般に各都市における総括的な需要行動量 $B(t)$ は何らかの確率分布関数として表現しうるものと考えられるが、ここでは最も簡単にある平均時刻を中心前後に直線的に増減分布するものと考えてみる。このとき図-4

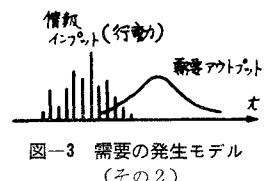


図-3 需要の発生モデル(その2)

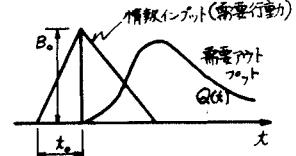


図-4 需要の発生モデル(その3)

3は図-4のように近似表示され、数式的には $B(t)$ はそれぞれ次式のように表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} B(t) = \frac{B_0}{t_0} \cdot t, \quad (t_0 \geq t > 0) \\ B(t) = -\frac{B_0}{t_0} t + 2B_0, \quad (2t_0 \geq t > t_0) \end{array} \right\} \dots\dots(4)$$

ここで B_0, t_0 はそれぞれ需要行動の大きさと時間間隔を表わす。すなわち、本文では需要特性を B_0, t_0 および k によって表示しうるよう基本モデルを考察している。

ラプラス変換を活用して式(3),(4)の両式から図-4に対応する $Q(t)$ を求めれば次式をえる。

$$\left. \begin{array}{l} Q(t) = \frac{kB_0}{t_0} (e^{-t} + t - 1), \quad (t_0 \geq t > 0) \\ Q(t) = \frac{kB_0}{t_0} (e^{-t} - 2e^{-(t-t_0)} + 2t_0 - t + 1), \quad (2t_0 \geq t > t_0) \\ Q(t) = \frac{kB_0}{t_0} (e^{-t} - 2e^{-(t-t_0)} + e^{-(t-2t_0)}), \quad (t > 2t_0) \end{array} \right\} \dots\dots(5)$$

したがって需要行動の分布を前述のように三角形表示による基本型の積み重ねによって近似的に類推するとき、そこに発生する需要量はそれぞれの行動に対応して得られる式(5)を積み重ねることによって求めうる。

従来、上水需要水量の1日時間変動実績は先にも述べたように一般に午前と午後にそれぞれピークを有する変動パターンを持つことが知られている。すなわち、総括的な都市の水需要行動として、午前の需要行動と午後の需要行動が考えられる。いま1日の典型的な需要行動を午前・午後に二分割して図-5に示すように表現してみる。

この場合、時刻 t における需要水量は次のように表わされる。

$$\left. \begin{array}{l} Q(t) = \frac{kB_{01}}{t_{01}} (e^{-t} + t - 1), \quad (t_{01} \geq t > 0) \\ Q(t) = \frac{kB_{01}}{t_{01}} (e^{-t} - 2e^{-(t-t_{01})} + 2t_{01} - t + 1), \quad (2t_{01} \geq t > t_{01}) \\ Q(t) = \frac{kB_{01}}{t_{01}} (e^{-t} - 2e^{-(t-t_{01})} + e^{-(t-2t_{01})}), \quad (t_{2s} \geq t > 2t_{01}) \\ Q(t) = \frac{kB_{01}}{t_{01}} (e^{-t} - 2e^{-(t-t_{01})} + e^{-(t-2t_{01})}) \\ \quad + \frac{kB_{02}}{t_{02}} (e^{-(t-2t_{01})} + (t-2t_{01}) - 1), \quad (t_{2s} + t_{02} \geq t > t_{2s}) \\ Q(t) = \frac{kB_{01}}{t_{01}} (e^{-t} - 2e^{-(t-t_{01})} + e^{-(t-2t_{01})}) \end{array} \right\}$$

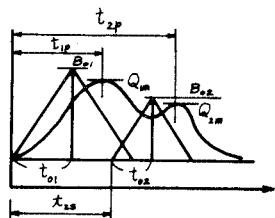


図-5 標準時間需要モデル

$$\left. \begin{array}{l} + \frac{kB_{02}}{t_{02}} (e^{-(t-2t_{01})} - 2e^{-(t-2t_{01}-t_{02})}) \\ + 2t_{02} - (t-2t_{01}) + 1, \\ (t_{2s} + 2t_{02} \geq t > t_{2s} + t_{02}) \\ Q(t) = \frac{kB_{01}}{t_{01}} (e^{-t} - 2e^{-(t-t_{01})} + e^{-(t-2t_{01})}) \\ + \frac{kB_{02}}{t_{02}} (e^{-(t-2t_{01})} - 2e^{-(t-2t_{01}-t_{02})}) \\ + e^{-(t-2t_{01}-2t_{02})}, \quad (t > t_{2s} + 2t_{02}) \end{array} \right\} \dots\dots(6)$$

ここでは午前午後の需要行動に関する係数をそれぞれ1, 2とサフィックス表示し、午後の需要行動の開始時刻を t_{2s} と表わす。また図-5に示すように需要のピーク時刻、ピーク時水量を以下それぞれ t_p, Q_m と表わすことにする。以上は需要行動の分布が最も典型的な場合で、いわば時間需要の標準モデルともいいうものである。生活用として目的を画一化しうる団地集団などでは生活パターンが各戸類似しているものと考えられるので、この標準モデルによる表示が可能であろう。しかし、一般的の都市における生活行動は多様で、特に集団規模が大きくなるにつれて種々の行動パターンが共存することも考えられ、それだけ需要変動は平均化されよう。このような場合、標準モデルではその特性を表現しきれず、次のような考察が必要になる。

ある地域集団がいくつか特性の異なる集団で構成される場合、たとえば標準パターンに1時間ずつ行動パターンにずれるある集団からなる地域での水需要行動は

図-6のように表わされる。この地域集団の総需要は図-7のようにピークが平均化される。わが国諸都市における最も平均的な需要時間変動も図-8に示すように、ピークに平均化が認められる⁵⁾。このように特性の異なるいくつかの集団からなる地域の需要をとり上げる場合は、それぞれの集団についての標準モデルを適宜合成して

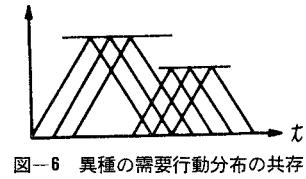


図-6 異種の需要行動分布の共存

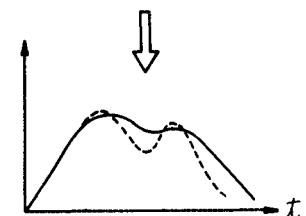


図-7 需要の平均化

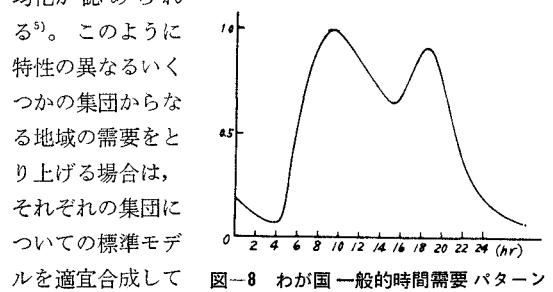


図-8 わが国一般的の時間需要パターン

ゆけばよい。ただ、ある地域集団の構成を特性の特異なそれぞれの集団に分割することは必ずしも容易でないので、後に示すような注意が必要となる。また、いくつかの集団を合成する一つの簡便法としては、需要行動のパターンを最初から平均化して図-9に示すようにインプット行動量をほぼ等しく（面積を等しく）台型化することも考えられる。このときの需要量は式(5)に対応して次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} Q(t) &= \frac{kB_0}{t_0} (e^{-t} + t - 1), \quad (t_0 \geq t > 0) \\ Q(t) &= \frac{kB_0}{t_0} (e^{-t} - e^{-(t-t_0)} + t_0), \\ &\quad (t_0 + 2T_0 \geq t > t_0) \\ Q(t) &= \frac{kB_0}{t_0} (e^{-t} - e^{-(t-t_0)} - e^{-(t-t_0-2T_0)} \\ &+ 2t_0 - t_0 + 2T_0 - 1), \\ &\quad (2t_0 + 2T_0 \geq t > t_0 + 2T_0) \\ Q(t) &= \frac{kB_0}{t_0} (e^{-t} - e^{-(t-t_0)} - e^{-(t-t_0-2T_0)} \\ &+ e^{-(t-2t_0-2T_0)}), \\ &\quad (24 \geq t > 2t_0 + 2T_0) \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

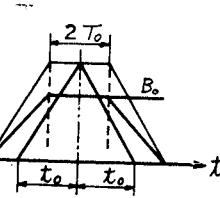


図-9 需要行動分布の平均化

図-5に対応して図-10を想定する場合も、同様に上に求めた式(7)の基本曲線を適宜合成してゆけばよい。一例として、 $(24 \geq t > t_{2s} + 2T_0 + 2t_{02})$ のとき、需要水量は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} Q(t) &= \frac{kB_{01}}{t_{01}} \{e^{-(t+T_0)} - e^{-(t+T_0-t_{01})} \\ &- e^{-(t-t_{01}-T_0)} + e^{-(t-2t_{01}-T_0)}\} \\ &+ \frac{kB_{02}}{t_{02}} \{e^{-(t-t_{02}+T_0)} - e^{-(t-t_{02}+T_0-t_{02})} \\ &- e^{-(t-t_{02}-t_{02}-T_0)} + e^{-(t-t_{02}-2t_{02}-T_0)}\} \end{aligned} \dots (8)$$

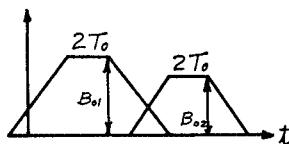


図-10 平均化需要行動分布

(3) モデルに基づく時間需要特性の分析

すでに述べたように、本文では標準的な需要の特性を需要行動の大きさ、時間間隔 ($B_{01}, B_{02}, t_{01}, t_{02}$)、および転換率 (k) によって表示することを試みている。一方、需要実績曲線には実測可能な特徴として二つのピークが現われることが知られている。すなわちピーク需要の出現時刻 (t_{1p}, t_{2p}) およびピーク需要量 (Q_{1m}, Q_{2m}) である。需要特性の一つの端的な表示法として、需要実

績にみられる結果としての $t_{1p}, t_{2p}, Q_{1m}, Q_{2m}$ を直接相互に比較することも考えられるが、できれば需要誘発原因にさかのぼり、そこでの可制御な特性を明確にしておく方がより重要である。そこで、 $t_{1p}, t_{2p}, Q_{1m}, Q_{2m}$ の実測値から特性値としての k および $B_{01}, B_{02}, t_{01}, t_{02}$ を解明する方法について以下検討を加えておく。

まず第1、2ピークよりそれぞれ次の条件をえる。

$$\left. \begin{aligned} \frac{dQ(t)}{dt} &= 0, \quad t = t_{1p}, \quad t = t_{2p} \\ Q(t_{1p}) &= Q_{1m}, \quad Q(t_{2p}) = Q_{2m} \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

式(6)の場合これらの条件から次式をえる。

$$t_{01} = t_{1p} + \log_e \left(\frac{1+e^{-t_{1p}}}{2} \right) \dots (10)$$

$$kB_{01} = \frac{Q_{1m} \cdot t_{01}}{t_{1p} + 2 \log_e \left(\frac{1+e^{-t_{1p}}}{2} \right)} \dots (11)$$

$$t_{02} = \frac{t_{2p} - t_{2s}}{\{2 - (Q_{2m}/kB_{02})\}} \dots (12)$$

$$kB_{02} = \frac{Q_{2m} \cdot t_{02}}{2t_{02} - t_{2p} + t_{2s}} \dots (13)$$

午後の水需要行動開始時点 t_{2s} が設定可能なとき、上の式(9)から式(13)を用いて各特性値を算定してゆけばよい。ただ、式(12)、(13)の両式から t_{02}, kB_{02} を求める場合、厳密には両式を連立して次のように試行錯誤的に解を求める必要がある。

$$\left. \begin{aligned} Q_{2m} &= (2t_{02} - t_{2p} + t_{2s}) \\ &\cdot \{-e^{-(t_{2p}-t_{2s})} + 2e^{-(t_{2p}-t_{2s}-t_{02})} - 1\} = K \\ K &= \frac{kB_{01}}{t_{01}} \{e^{-t_{1p}} - 2e^{-(t_{1p}-t_{01})} + e^{-(t_{1p}-2t_{01})}\} \end{aligned} \right\} \dots (14)$$

上式の K 値を一般需要実績で想定される t_{01}, t_{2p} などを用いて算定し、 Q_{2m} 値と相対的に評価すれば、ほぼ 10^{-2} 倍のオーダーの微小項であることがわかる。近似的に K 値を無視すれば次の近似式をえる。

$$t_{02} = (t_{2p} - t_{2s}) - \log_e \left\{ \frac{2}{1 + e^{-(t_{2p}-t_{2s})}} \right\} \dots (15)$$

近似的には上の式(15)より直接 t_{02} 値を求め、式(13)より kB_{02} 値を算定しうる。ところで、各特性値算定の前提となる t_{2s} 値の設定については、実績需要曲線での第1、第2両ピーク間の極小点時刻より算定する方法もある。しかし、近似的には午前と午後に二分する水需要行動の定義から t_{2s} を正午と設定すれば十分と考える。一般需要の場合についても同様に各特性値を算定してゆけばよい。たとえば、図-10に示すように需要行動を台型近似する場合で、第1ピークが $(t_{2s} \geq t > t_0 + T_0)$ 、第2ピークが $(t_{2s} + 2T_0 + 2t_0 \geq t > t_{2s} + 2T_0 + t_{02})$ にあるとき、各特性値は次式により算定することができる。

$$t_{01} = t_{1p} - \log_e \left\{ \frac{e^{-T_0} + T_0}{1 + e^{-(t_{1p} + T_0)}} \right\} \quad \dots \dots \dots \quad (16)$$

$$kB_{01} = Q_{1m} t_{01} / \{ e^{-(t_{1p} + T_0)} - e^{-(t_{1p} + T_0 - t_{01})} - e^{-(t_{1p} - t_{01} - T_0)} + 2t_{01} - t_{1p} + T_0 + 1 \} \quad \dots \dots \dots \quad (17)$$

$$t_{02} \approx (t_{2p} - t_{2s}) - \log_e \left\{ \frac{e^{-T_0} + e^{T_0}}{1 + e^{-(t_{2p} - t_{2s} + T_0)}} \right\} \quad (18)$$

$$kB_{02} \approx Q_{2m} t_{02} / \{ 2t_{02} - (t_{2p} - t_{2s}) + T_0 \} \quad \dots \dots \dots \quad (19)$$

3. わが国における需要時間変動の分析と考察

(1) 団地における水需要の分析と標準モデルの検証

以上に示したモデル考察の有用性を明らかにするために、まず分析の基本となる標準モデルの検証が必要である。標準モデルとしては需要行動パターンが均一で、図-6に示すような異種パターンが共存しない地域での需要が対象となる。今日わが国に多くみられる住宅団地では一般に通勤者の居住地としていわゆる生活用水以外の需要はあまり考えられず、生活行動もかなり均一なものと考えうる。そこで標準モデルの検証をも目的として、わが国一般団地における典型的な生活用水需要の実績を以下に分析してみる。

図-11, 12, 13

はわが国における生活用時間需要の一つの標準として、任意にとり上げた団地給水の実績^⑥をピーク水量を基準にして図示したものである。この場合、図に示される夜間水量から変動に関係しない基本水量として0.1、したがって Q_{1m} は 1.0 からこの基本水量を差引いた約 0.9 であることがわかる。変動開始時刻 5 時

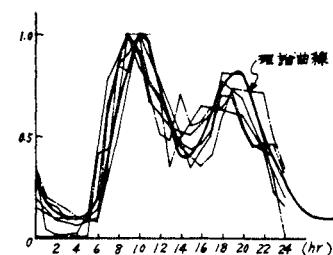


図-11 団地需要実績と需要理論曲線（その1）

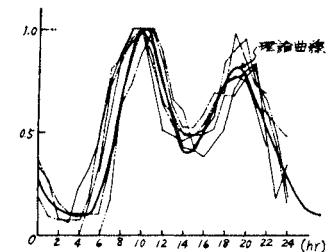


図-12 団地需要実績と需要理論曲線（その2）

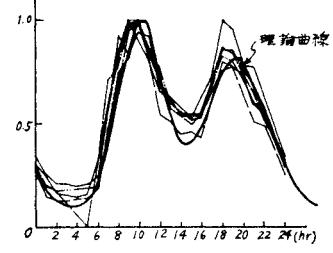


図-13 団地需要実績と需要理論曲線（その3）

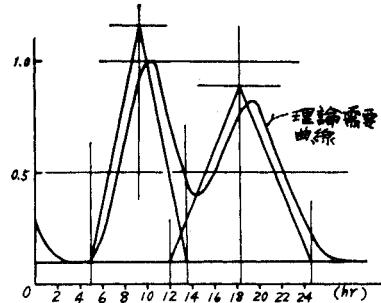


図-14 需要実績からの需要行動分析例

を基準値 0 とし、 $t_{1p}=5.0$, $t_{2p}=14.0$, さらに $Q_{2m}=0.7$ と定めうる。なお、標準パターンでの日平均水量に対するピーク時水量の比率はほぼ 1.9 程度であることもわかる。さて、午後の需要行動開始時刻を正午とみなし、 $t_{2s}=(12 時 - 5 時)=7.0$ と設定した上で上記実測値から標準需要パターンの各特性値を算定する。式 (10), (11) の両式より $t_{01}=4.3$, $kB_{01}=1.06$, 式 (13), (15) の両式より $t_{02}=6.3$, $kB_{02}=0.79$ が求まり、需要の誘発原因を図-14 のように定量化しうる。図の縦軸として kB_{01} および kB_{02} をとり、現段階では k 値と B_0 値を一括して取り扱っているが、今後 k 値の定量化がすすめば、需要行動量としては図の $(1/k)$ 倍量として算定すればよい。逆に行動量の定量化ができれば同様に k 値が求まる。以上に算定した t_{01} , kB_{01} などの値を用いて式 (6) を数値計算した結果を図-11 から図-13 の実績値に併記してみた。図からも明らかなように理論値は実績値に十分適合しているといえる。いいかえれば生活様式がほぼ一様と思われる地域に対し、以上に検討した標準モデルの考察がほぼ妥当なものであることを認めうる。同時にわが国における一般団地の水需要行動の特性を次のように指摘できよう。つまり、午前の水需要行動は午前 5 時ごろより始まり、9 時すぎにピークに達する。実際の水需要は行動開始からほぼ一時間ほど遅れる。午後の需要行動は午後 6 時ごろがピークで、行動の分散度は午前の行動が約 8 時間であるのに対し、約 12 時間と長い。反面、行動のピークが午後は午前の約 85% で集中度が少ないことがわかる。ところで、同じ団地需要実績のうち以上に示した実績と若干異なるパターンを示すものを集めたのが図-15 である。すでに算定した図-14 の標準パターンを破線にて図中に併記しているが、図からも明らかなように昼間の需要パターンにみられる

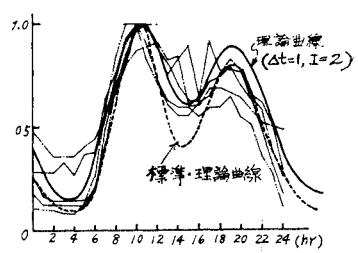


図-15 団地需要実績と需要理論曲線（その4）

極大極小値の比率すなわち極値比に減少が認められ、需要の平均化が現われている。こういった場合は一般需要パターンとしての分析が必要となり、この団地では異質の需要パターンを持つ生活団体が共存しているものと推定できる。そこで以下、実績需要量から逆に集団構成を推論する手法について簡単に検討を加えてみる。

(2) 一般需要の分析に関する考察

本文では一般需要を需要行動が標準パターンの複数共存になる場合と台型表示となる場合の両者として取り上げている。そこで、先に分析した典型的な団地の需要実績を生活用水需要の標準パターンとみなし、その需要行動が時間的にずれた型で共存する場合、および台型化される場合、それぞれ需要はいかに変化するかを検討してみる。一つの標準パターンに対し図-16に示すようにそれぞれのずれ時間 Δt 、前後にそれぞれ I 個、計 $2I+1$ 個の需要行動が共存する場合について需要曲線を求めたのが図-17である。 I の増大によって需要変動は平均化され、昼間時間需要の極値比が小さくなつてゆくのが特徴である。一般需要の場合、上述のように同一の需要行動が規則的に時刻のみ前後にずれて共存するとは

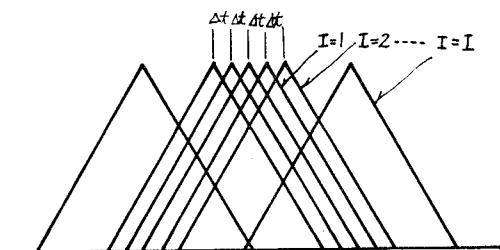


図-16 需要行動の複数共存

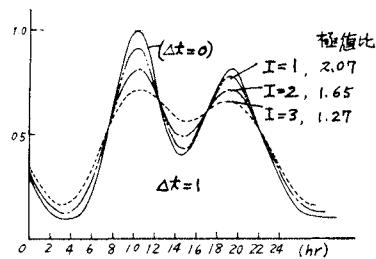


図-17 需要の平均化理論曲線(その1)

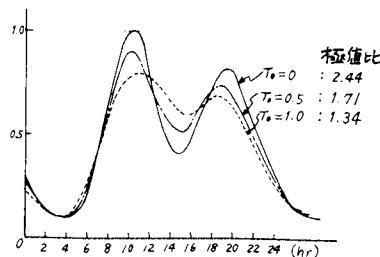


図-18 需要の平均化理論曲線(その2)

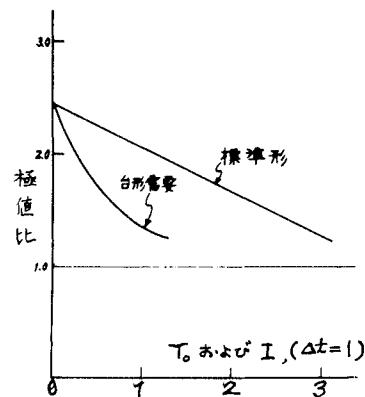


図-19 需要曲線の平均化と極値比

限らず、種々の型の需要行動が不規則に共存するものと考えられる。しかし、変動の平均化に関する限り、その特性を上述の Δt , I の効果に置換して近似的に表示することが可能であろう。同様に、需要行動の台型化にともなう需要行動の平均化を検討すれば図-18を得る。ここでも図-9に示す T_0 値の増大にともない昼間時間需要の極値比に顕著な減少を認めうる。いま、極値比を図-17, 図-18から求めて図示したのが図-19である。以上は Δt , I あるいは T_0 による特性の置換表示によるところから、一般需要の厳密な意味での需要行動の分布型を示すには至らないけれども、あくまで標準型との対比のもとに一般都市における水需要集団の構成を知る目安とはなりうる。つまり、一般需要の分析に当っては、分析に先だち実績曲線からまず極値比を算出すれば、図-19を活用して対象地域での需要行動の分布・構成をある程度推論でき、個々の標準型需要集団に分割することが可能になる。分割したそれぞれの需要の分析についてはすでに2.(3)に述べた通りで、それぞれに得られる結果を総合して一般需要の特性を解明すればよい。図-8に示したわが国一般都市における需要の変動実績を以上によって分析した結果、図-20に示すように平均的にはほぼ $\Delta t=1$, $I=2$ の5種程度の異種需要集団にて都市が構成されていることを類推しうる。図-15に示した例外的な団地実績の場合も図中に示すようにはぼ一般都市と同程度の構成を示しているようである。生活団地も大規模化してくれば一般都市の需要特性に類似していくことが十分予想される。

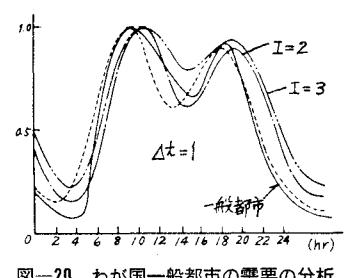


図-20 わが国一般都市の需要の分析

4. 時間需要の弾力性について

以上、モデルの考察を中心に時間需要の特性を検討してきた。分析の第1歩として需要行動の詳細な内容にはふれずにあらゆる行動を一括して取り扱っているが、活用いかんにより需要の総括的な特性を評価するのに効果的である。そこで、従来の水道計画ではあまり考慮されなかった各種の需要対策について、以下2, 3の例に簡単な考察を加え、本文の活用方向を探っておく。今後調査資料の集積とともに需要行動の細分表示が可能になれば、この種の分析はより重要なものと考えられる。

今後需要に種々の制約が加わるという新たな事態も十分予測されるが、従来の需要分析の結果からは言及しがたい問題が多い。たとえば節水が余儀なくなれば、いかなる需要行動まで制約をうけ、需要はいかに発生するか、あるいは水道料金が大幅に値上がりすればいかなる需要行動に節約意識が働き、需要はいかに変動するかなどである¹⁾。また、現状では大部分午前中に行なわれる洗濯が乾燥機の普及によって午後に行ないうるようになれば、午前の水需要行動の午後への変換がみられよう。

さて、本文の活用として、午前の需要行動を一部午後にふりかえた場合の需要量におよぶ影響については、式(6)をもとに予測すれば図-21に示すように求まり、需要パターンの変化を認めうる。この例からもわかるように、水需要は決して固定化したものではなく、種々の

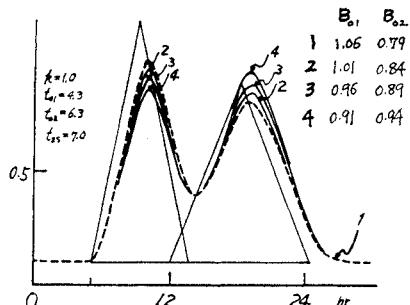


図-21 午前の需要行動が午後にふりかわる場合の需要の変化

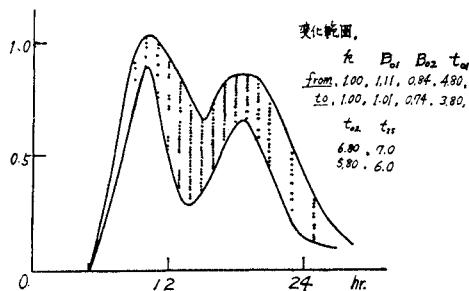


図-22 考察しうる需要曲線の変化範囲例

表-2 記号説明、[] 内は単位の一例

t : 時刻あるいは時間 (1時間を基準とする相対時間), [無次元]
t_0 : 需要行動の時間間隔 (サフィックス 1, 2 がつくときそれぞれ午前・午後を指す), [無次元]
t_{2s} : 午後の需要行動開始時刻, [無次元]
t_p : ピーク需要の発生時刻, (サフィックス 1, 2 は上に同じ), [無次元]
T_0 : 需要行動を台形表示するときの行動時間間隔, [無次元]
T : 期間, [年]
$Q(t) : t=t$ における需要水量 (本文の分析ではピーク時水量を基準値 1.0 とする相対水量 [無次元] をとる.)
Q_m : ピーク時需要水量, (サフィックス 1, 2 は上に同じ)
$B(t) : t=t$ における需要行動量
B_0 : 需要行動の大きさ, (サフィックス 1, 2 は上に同じ)
B_0 : 需要行動の日量
$I(t) : t=t$ における時刻情報量, (本文では単位無関係)
$I, \Delta t$: 需要行動パターンの共存状態を表わす数, [無次元]
α_j : 適宜ディメンジションをもつ定数, $j=1, 2, 3, 4$
k : 需要行動の需要水量への転換率 (誘発率), $[B(t)/Q(t)]$ に対応する単位
k_1, m_1 : 前報 ¹⁾ に定めた需要特性係数
q : 年間 1 人当たり需要水量 [$m^3/\text{人}\cdot\text{年}$]
ΔQ_m : 長期需要変化における終局変化量
s : ラプラス変換変数

条件変化に対応して変化しうるものと考えられ、弾力的なものといえよう。本文に取り上げた要因 $k, B_{01}, B_{02}, t_{01}, t_{02}$ だけでもそれぞれ微小量変化すれば需要パターンに変化がみられる。図-22は考えうる可能性として、各要因の微小な変化に伴う時間需要への影響を式(6)から試算し図示したものである。しかし、ここに示す需要の弾力性はあくまで可能性を示すもので、実際はそれほど大きな需要行動の同時変化を期待しえないので、その弾力性はもっと限定されたものと考えるのが妥当であろう。各種上水施設の設計段階で需要水量がいかなる変動パターンをもつかは重要な問題で、変動幅を小さく平均化することができればそれだけ諸施設の建設・管理も容易になり、経費も節減されることが知られている。しかし、以上のように、時間需要は顕著な経費節減を期待しうるほど弾力的なものとはいえない。いいかえれば、経費節減を目的に水の需要行動を著しく制御するということはきわめて困難で、一時的にはともかく平均的には需要行動はそれほど弾力的ではないといえよう。したがって、需要にある程度弾力的な性格がある点に注目して意図的に需要の変化を期待するいわゆる広義の需要制御としては前報¹⁾に示したように長期にわたる対策が不可欠であろう。水道料金の値上げや施設拡張を長期的にコントロールして需要者の水に対する価値意識を変化したりなどが考えられる。ところで、先の検討から一般需要における日総需要水量 Q は式(6)に示す標準需要の 24 時間分の積分値として次のように表わされる。

$$\begin{aligned} \bar{Q} &= \frac{kB_{01}}{t_{01}} \{2e^{-(24-t_{01})} - e^{-(24-2t_{01})} + t_{01}^2\} \\ &\quad + \frac{kB_{02}}{t_{02}} \{2e^{-(24-t_{02})} - e^{-(24-2t_{02})} + t_{02}^2\} \\ &\quad + (\text{基本水量}) \times 24 \dots \dots \dots (20) \end{aligned}$$

これより、基本水量を考慮しない場合、日需要水量は近似的に次式のように表わされる。

$$\bar{Q} = k(B_{01} \cdot t_{01} + B_{02} \cdot t_{02}) = k\bar{B}_0 \dots \dots \dots (21)$$

ここで、 $\bar{B}_0 = B_{01} \cdot t_{01} + B_{02} \cdot t_{02}$

日需要水量は需要行動の日量 \bar{B}_0 と行動の需要発生への転換率 k によって決るというきわめて当然の結果を得る。これより年間総需要水量は 365 日分の日需要水量として求められる。したがって、料金値上げなどにより長期的に需要がコントロールされる際の転換率 k の長期的な変化量は、需要行動が変化しない場合、前報の結果を導入して次のように表わすことができる。

$$365 \cdot \bar{B}_0 \cdot \Delta k(T) = \Delta Q_m (1 - e^{-\frac{(1+m_1)^t}{k,q} \cdot T}) \dots \dots \dots (22)$$

ただし、 T は年、 Δk は k 値の変化量、 q は 1 人 1 日当り平均需要水量、 m_1, k_1 はともに定数。 ΔQ_m は年間需要水量の最終増加水量。これより次式をえる。

$$\begin{aligned} \Delta k(T) &= \bar{Q}_m (1 - e^{-\frac{(1+m_1)^t}{k,q} \cdot T}) \dots \dots \dots (22)' \\ (\bar{Q}_m &= \Delta Q_m / 365 \bar{B}_0) \end{aligned}$$

前報に求めた m_1, k_1 値を代入して上式より k 値の変化量 ($\bar{Q}_m = 1.0$) を図示したのが図-23 である。転換率 k の変化は需要者の水に対する価値観が比較的密接に関連してくると考えられるので、図から現在 1 人 1 日当り日需要水量 q の小さいところでは水に対する価値観は急激には変化しないのに対して、 q が大きい都市ではその変化が相対的に大きいこともわかる。長期対策による需要の圧縮性を示す一つの例として、図-23 から予測できる次の例から都市における水需要の長期的な弾力性をうかがい知ることもできる。たとえば、一例として終局的に $\Delta Q_m = 0.3$ の需要増を意図した施設拡張など長期需要対策がとられた場合、転換率 k 値が終局的には図-23 の 3 割量長期にわたり増大するものと考えることもできる。この k 値の変化は当然時間需要に直接影響をおよぼす。需要を圧縮する場合についても圧縮量が小さい限り、同様に k 値の減少としてその影響が

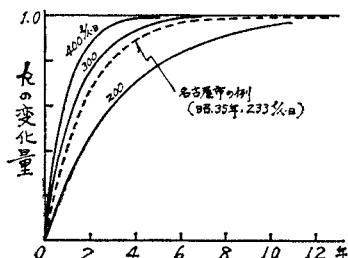


図-23 需要対策による値の経年変化例

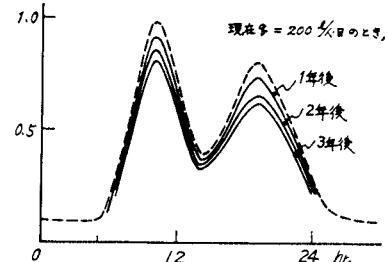


図-24 需要対策による需要圧縮速度予測例(その1)

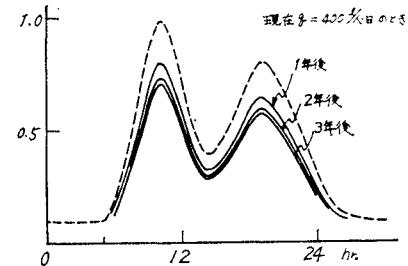


図-25 需要対策による需要圧縮速度予測例(その2)

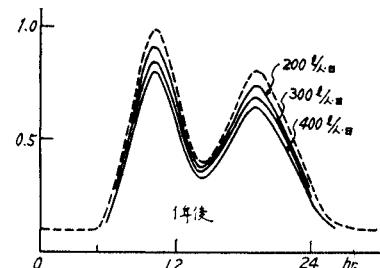


図-26 需要対策による1か年の需要圧縮量予測例

およぶものと考えれば、いまある長期的な需要圧縮策に対する需要の変化量は式(6)をもとに図-24 から図-26のごとく予測算定される。現在の需要規模いかえれば現在の水の使い方によって各都市それぞれ需要の圧縮量および速度にかなりの差異があることもわかる。

以上、現段階では定量精度に多くの問題を残しているが、この種の検討から今後の需要対策の方向を示唆するものと考える。

5. おわりに

数か年におよぶ長期的な需要変動の分析を行なった前報にひきつづき、本文では変動時に現われる潜在的な特性に注目して、需要の時間変動に分析を加えたものである。需要の発生機構の考察から需要特性の分析法を重点的に検討し、ピーク需要の現われ方からいくつかの特性を指摘する方法を示した。途中大胆な仮定や近似を採用しているので本文全般を通じて精度が重要な問題として残されるが、わが国団地地域における需要実績を用いて

一応の検証を行ない、その有用性も示してある。ただ、さらに広範な需要実績に対しても十分効果的であるためには必ずしも検証が十分とはいえない。新たな実績調査とともに本文に示す方法で順次分析整理を重ねてゆく必要がある。このほかにも精度上いくつかの問題点を残すが、特に本文が現段階では都市における上水需要の総括的な特性把握にとどめている点に注意が必要で、これらの問題も今後の調査と分析を通じて相互に解決されてゆくものと考える。いずれにしろ上水道の需要特性に対し、新しい角度から新しい分析法を示したので、今後の上水道の計画合理化に与える効果は決して少なくないだろう。近い将来水源の質的な枯渇などから上水需要に種々の制約が加わってくることも十分考えられる。こういった新しい事態に対処するためには需要を最優先してゆく従来の水道計画法がある程度変質せざるをえないかもしれません。次報に予定する需要の季節変動の分析をも加えて、前報に一連する新たな需要分析法が既存需要のこれまでにかえりみられなかった特性を明らかにし、ひいては上記のごとく、今後の水道計画の進むべき方向に對してもいくつかの示唆を行なうものと期待している。

本文を終るに当り、本研究は京都大学工学部衛生工学科教室 末石富太郎教授を中心とする需要分析研究の一環として行なわれたもので、同教授より多大の助言を得たことを付記し、ここに感謝の意を表わす。また、同研究グループとして、本研究などのマクロな需要分析に対し、ミクロな需要分析を試みている山田淳助手からも多大の助言を得た。ここに感謝の意を表わす。

参考文献

- 1) 住友 恒：都市における上水需要量の変動特性について、土木学会論文集第 158 号、昭 43-10
- 2) 末石富太郎・住友 恒・山田 淳：用途別給水計画、日本水道協会第 18 回全国水道研究発表会、昭 43
- 3) 末石富太郎・山田 淳・松本忠生：用途別給水計画の研究、同上、第 19 回、昭 44
- 4) 末石富太郎・山田 淳：用途別給排水に関する基礎的研究、土木学会第 24 回年次学術講演会講演集、昭 44
- 5) 日本水道協会：水道施設基準解説、1966
- 6) 徳平 淳・綾 日出教：日本住宅公団団地の下水処理場の実態調査、下水道協会誌、Vol. 1, No. 5, Vol. 2, No. 14 など
- 7) 末石富太郎・住友 恒：弾力性概念による需要水量と浄水場設計の分析について、土木学会第 5 回衛生工学研究討論会講演論文集、昭 44

(1971.1.9・受付)