

都市における上水需要量の変動特性について

—需要の季節変動の分析—

DYNAMIC ANALYSIS OF SEASONAL DEMAND IN WATER SUPPLY SYSTEM

住 友 恒*

By Hisashi Sumitomo

1. はじめに

諸現象には定常下では現われず変動時のみに現われてくる潜在的な特性が少なくない。また変動下では、変動の原因と結果の直接的な相関分析が可能になることが多い。これらの理由から、筆者はこれまで都市における上水需要量の変動に注目していくつかの分析を加えてきた^{1),2)}。一つには定常下では分析し難い潜在的な需要意識の分析、いかにすれば人々の水に対する価値観を定量化することを目的としてきた。また一つには現状ではあまり考えられないが、近い将来何らかの需要制御が不可避になるものとの観点からその可制御性を分析することに重点を置いてきたともいえる。具体的には需要の時間的変動から需要誘発因子としての需要行動の分析、あるいは施設拡張後の数年におよぶ長期的な需要増から人々の水に対する長期的な価値意識を分析してきた。需要分析としてはこの誘発因子としての需要行動分析と価値意識に基づく行動から需要への転換率の分析が基本である。後者は定常分析では原単位分析として従来総括的に定量化されているが、その基本ともいべき水に対する価値意識が定量的に議論されたことはこれまでほとんどない。

本文では、都市における上水需要の季節変動を取り上げるが、その変動原因は検討してみるまでもなく気温の変化といえる。

自然条件としての気温は現在制御可能とはいえないので、この変動分析の場合、需要の制御性の分析よりもむしろ需要意識の分析が中心となる。季節変動の場合、数ヶ月におよぶ変動を対象とするので、すでに分析した長期的な価値意識の分析に比べて、比較的短期的な価値意識を分析対象とするのが特徴である。

2. 上水の季節需要のモデル化とその分析

(1) 季節需要の特性

都市における上水の月別需要実績を見れば、需要量が冬期から夏期、夏期から冬期へと大きく変動する顕著な特徴を認めうる。主として気温の変化に伴い水の必要度が大きく変化しているといえる。具体的には、気温の変化に伴って需要行動の量、質に変化が現われ、さらには需要行動の需要水量への転換率にも変化が生じているものと考えられる³⁾。ところで、その変化の様子は必ずしも一定したものではなく、図-1にも示すように地域的にも差があり、北海道のような寒冷地と関東以南では明らかに異なる³⁾。さらに、気温の変化を気温の上昇期と下降期に分割して気温と需要量の相関に注目すれば、図-2に示すように気温の下降期の方が相対的に需要が大きいこともわかる³⁾。また、気温は年間を通じて一周期を持つところから気温と需要の相関にも一つの周期性が認められる。総括的なこれらの特性のうち特に注目されるのは需要が同一気温でもその上昇期と下降期に差がある点で、その原因を探ればまた新たな需要特性が明らかになるものと類推できる。一つには同一気温でも上昇期と下降期では人々の実感としての暑さ寒さ感に差がある

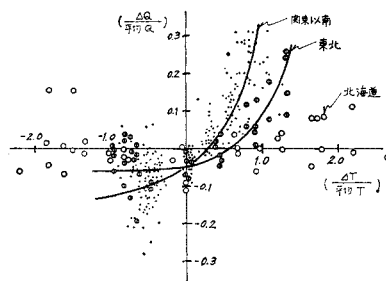


図-1 気温と需要量の月変化の相関にみられる地域差

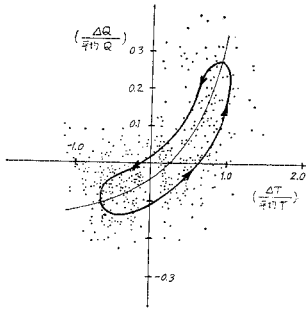


図-2 気温と需要水量の月変化の相関にみられる周期性

ことが考えられる。湿度など他の要因の影響も考えられるが、一般に同一気温でも上昇しつつあるときはより暑く感じ、下降しつつあるときは一段と涼しく感じることを経験的に認めうる。夏に冷房のきいた部屋から急に戸外に出るとき、一段と暑く感ずる経験などその端的な一例といえよう。このように気温の上昇期と下降期では暑さ感に差があり、それがひいては需要量に差を生ずる原因となっているとも考えられる。また一つには人々の水に対する価値意識が需要の増減期と減少期では異なることも考えられる。特に夏の暑いさ中、水のありがたさは冬に感ずる以上のものがあるとも考えられる。また需要が増大すればするほど需要に制約の加わる可能性が高まることから、水の使用にある種の節約意識が働くことも考えられる。この両者から人々の水に対する意識は需要がいかに増大しつつあるかに影響をうけるはずともいえる。夏期における需要の増加がこのような人々の暑さに対する意識と水に対する価値意識に影響をうけているものと考えれば、季節需要の特性を分析することによって人々の水意識をある程度解明しうるかもしれない。定常下では追跡しがたいこのような潜在的な特性をも解明してゆくことが、一連する変動分析の最大の目的でもある。

a) 気温と暑さの関係について

上述のような需要誘発の原因となる暑さの意識を現段階で定量的に表現することはきわめて困難である。いわゆる不快指数の定量的表示に当って、湿度が関連することからみても、暑さを気温のみで表示することには大きな限界があろう。しかし、本研究では人々の水意識の定量化を主な目的とするので、暑さについてはひとまず一つの意識を設定し、その条件下での人々の水に対する意識を相対的にでも定量化することができればよいと考える。そこで、同一気温でも、上昇期と下降期では人々の暑さに対する実感が異なるという前述の特性のみを重視すれば、人々の暑さに対する意識を次のように表わすことができる。

$$H = \alpha_1 \cdot T + \alpha_2 \cdot \frac{dT}{dt} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 H は暑さの意識の程度、 T は気温、 t は時間でこの場合月単位をとる。各 α は定数係数で、それぞれ特定のディメンジョンを持つ。ここでは暑さが気温値とその変化の程度の両者によって一義的に決まるものと考

えている。ところで、 α_1, α_2 の両係数の定量化にも多くの問題があり、気温の変化が暑さ感に直接関連することを定性的には指摘しえても、相対的にであれこれを定量化することは非常に困難である。そこでここでは、以下水意識を定量化するための一つの設定値として $\alpha_1=1.0$ とし、これに対する α_2 の相対値のみを簡単に検討しておく。いま α_2 の H に及ぼす影響量を調べるために、わが国における平均的な気温変動に対する H の算定例を図-3に示す。図中破線で示す気温実測値に対し、 α_2 の値によっては暑さ感が気温値よりも前後に時間ず

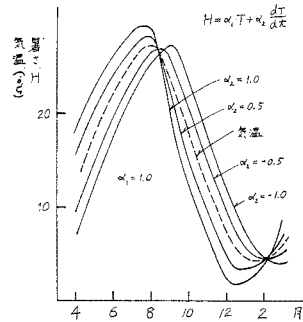


図-3 気温と暑さの関係

れが生ずることがわかる。8月が暑さのピークで、9月は7月に比べて一般に涼しいという経験的な判断から、 α_2 は正值をとり暑さは気温値よりも時間的にやや7月側にずれるものとするのが妥当であろう。ただ、図に示されるずれの程度および、9月と7月の H の比較などから α_2 値としては経験的に 1.0 以下の値をとるものとするのが妥当であろう。つまり α_2 値はおおよそ 0 から +1.0 の間の数をとるといえるようである。

b) 需要意識の表示について

人々が水を使用する場合は一般の市場製品を購入する場合と異なり、特にその効用を考えたり価格の妥当性を十分検討してから使用を開始するということはあまり考えられない。しかし、まったく無頓着に使用しているともいえないようで、料金が急激に上昇すれば一時的にもある程度需要が減少することも考えられる⁹⁾。人々の水に対するこの種の意識は価値観と定義しきれない範囲のものかもしれないが、たとえば風呂用水を満たす際の節約意識あるいは散水時の水意識の存在などは人々が十分経験することであろう。この種の意識が社会的に総括されて、上水の需要にも当然この意識が各様に働いているものと考えうる。経済的に裕福な地域と貧困地域、あるいは水源に恵まれた地域とそうでない地域とではこの種の意識の差が一つの需要特性の差異として現われていることも十分考えうる。しかし、これまで国の内外を問わず、この種の意識あるいは水に対する価値意識が定量的に分析された例はきわめて少ない。

ところで本研究に取り上げる都市における季節変動の実績例を図示すれば 図-4 を得る。気温の上昇期と下降期に需要パターンに差異が認められ、特にピーク需要率に圧縮があればあるほど下降がゆるやかになる特徴が

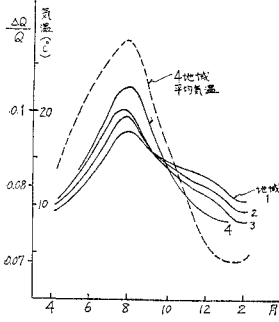


図-4 都市における上水需要の季節変動実例

認められる。しかるに上昇期にはその傾向に顕著な差はない。需要の増大期と減少期に別個の需要意識が働いているものと考えうる。特に減少期には節約意識が無意識のうちにも少なくなり、余裕のある需要意識が働いているとも考えうる。そこで本研究では、季節変動を対象としながらこの需要意識にもとづく需要特性の分析に焦点を絞ってみることにする。

さて、需要意識はまずそれぞれの時点でどの程度の需要を行なっているかに依存するものと考えることができる。多量の需要があるときはそれだけ節約意識が働いてくるものと考えうるし、逆に需要が少ない場合あまり節約意識が働くとはいえられない。また先の変動例にもみられるように、需要がどんどん増加しつつある時点と、逆に、減少しつつある時点ではこの意識に差異がみられるものと考えうる。そこで一つの仮定として、ひとまず人々の水に対する需要意識は上記ふた通りに現われるものとみなせば、前者を第一項とし後者を第二項としてこれを次式のように表わすことができる。

$$h = \beta_1 \cdot Q + \beta_2 \cdot \frac{dQ}{dt} \dots\dots\dots (2)$$

ここで h は人々の水に対する需要意識で、 Q は月単位の需要水量、 t は式 (1) と同様に月単位の時間で、 β_1 、 β_2 はそれぞれディメンジョンを持つ定数係数とする。この β_1 、 β_2 の大小为需要意識の大小を表わし、ひいては需要特性を表示するものといえる。

(2) 季節需要のモデル化と考察

季節需要の発生過程を以上から総括的に次のようにとらえることができる。1) まず気温が月々の自然条件として設定される。2) 人々は気温に応じて暑さを感じ、3) 暑さ感から潜在水需要が発生する。このとき水に対する節約意識などが働かなければ、この潜在需要がそのまま需要水量として具体化するものと考えられるが、ここでは 4) その時点での需要状況に応じて節約意識などが働くものと考えるので、需要意識が潜在需要に抑制あるいは増加力として働く。この一連の過程を图示すれば、図-5

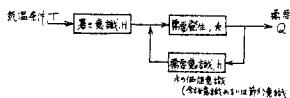


図-5 季節需要の発生過程のモデル

に示すような一つのフィードバックシステム

表-1 記号説明、() 内は単位の一例

H ;	暑さ意識、(H)、ただし単位 H は未定義
h ;	需要意識、(H)
T ;	気温、(度)
t ;	時間、(月)
$Q, Q(t)$;	月需要水量、(m ³ /月)
k ;	暑さ意識の需要への転換率、(m ³ /月・H)
α_1 ;	気温と暑さ意識の相関係数その 1、(H/度)
α_2 ;	同上その 2、(H・月/度)
β_1 ;	需要意識と需要水量の相関係数その 1、(H・月/m ³)
β_2 ;	同上その 2、(H・月 ² /m ³)
G_1 ;	気温の暑さ意識への伝達関数、(H/度)
G_2 ;	需要意識の需要水量への伝達関数、(H・月/m ³)
x ;	α_1/α_2 、(1/月)
y ;	$(k\beta_1 - 1)/k\beta_2$ 、(1/月)
T_0 ;	気温ピーク値、(度)
Q_p ;	需要水量ピーク値、(m ³ /月)
ω ;	気温変動周期特性、(1/月)
ϕ ;	需要の位相ずれ、(無次元)
サフィックス、 i, d ;	上昇期 (i)、下降期 (d) を指す
q ;	1 人 1 日 当り 需要水量、(l/人・日)
\bar{q} ;	1 人 年 間 需要水量、(m ³ /人・年)
m_1, k_1 ;	前報 ¹⁾ に定義する需要の特性係数 ($m_1 \cong q_1/q_2$ 、あるいは $m_1 \cong \bar{q}_1/\bar{q}_2$)
q_1, \bar{q}_1 ;	不可欠需要水量
q_2, \bar{q}_2 ;	余裕需要水量
s ;	ラプラス変換変数

として表現され、暑さ意識の需要誘発率 k を導入して、需要水量は次式のように表わされる。なお、本文に用いる各記号を表-1 に一括しておく。

$$Q = k \cdot (H + h) \dots\dots\dots (3)$$

ここで、気温と暑さ意識の伝達関数を G_1 、節約などの需要意識の伝達関数を G_2 とすれば次式をえる。

$$H = G_1 \cdot T, h = G_2 \cdot Q \dots\dots\dots (4)$$

ところで、式 (1)、(2) より G_1, G_2 はラプラス変換変数 s を用いてそれぞれ次のように表わされる。

$$G_1 = \alpha_2 \left(s + \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) \dots\dots\dots (5)$$

$$G_2 = \beta_2 \left(s + \frac{\beta_1}{\beta_2} \right) \dots\dots\dots (6)$$

式 (5)、(6) を式 (4) に代入し、さらにそれぞれを式 (3) に代入すれば季節需要は次式のように表わされる。

$$Q(s) = \frac{k \alpha_2 \cdot \left(s + \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right) \cdot T(s)}{1 - k \beta_2 \cdot \left(s + \frac{\beta_1}{\beta_2} \right)} \dots\dots\dots (7)$$

式 (7) は次の式 (8) の変数変換によって式 (9) のように表わされる。

$$x = \frac{\alpha_1}{\alpha_2}, y = \frac{k\beta_1 - 1}{k\beta_2} \dots\dots\dots (8)$$

$$Q(s) = \left(-\frac{\alpha_2}{\beta_2} \right) \cdot \frac{s+x}{s+y} \cdot T(s) \dots\dots\dots (9)$$

ここで x, y は式 (8) からわかるようにそれぞれ定数で、 x は暑さの感じ方を表わし、 y は暑さ感の需要誘発率と需要意識によって定まる特性係数ともいえる。ところで、月単位の気温はわが国では近似的に正弦関数にて表わしうる。特に冬期を除き春から秋にかけての期間に限定すれば、気温を正弦関数で表現することに特に問題は無いので次式をえる。

$$\left. \begin{aligned} T(t) &= T_0 \sin(\omega t) \\ T(s) &= T_0 \omega \cdot \frac{1}{s^2 + \omega^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(10)$$

式 (10) を式 (9) に代入し、これを逆変換すれば結局季節需要は次のように表わされることがわかる。

$$\left. \begin{aligned} Q(t) &= \left(-\frac{\alpha_2}{\beta_2} \right) T_0 \omega \cdot \left[\frac{x-y}{y^2 + \omega^2} \cdot e^{-y t} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\omega} \sqrt{\frac{x^2 + \omega^2}{y^2 + \omega^2}} \cdot \sin(\omega t + \phi) \right] \\ \text{ただし、} \phi &= \tan^{-1} \left(\frac{y}{\omega} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x}{\omega} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots(11)$$

式 (11) の ϕ は気温と需要の時間ずれを表わす位相差である。一般に季節需要は 図-4 からわかるように 8 月がピークで、気温のピーク時と需要のピーク時が合致するので、気温上昇期あるいは需要増大期からみれば月単位需要を対象とする限りこの ϕ の存在を認めることはできない。一方、気温下降期、需要減少期には 図-4 からわかるようにこの時間ずれが認められる。いかえればこれら両期間の需要特性に顕著な差が認められるので、上に求めた式 (11) に特定の係数値をそれぞれ導入して全期間の $Q(t)$ を一式にて表示することは困難のようである。そこで 図-6 に示すようにピーク時すな

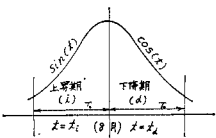


図-6 気温の上昇期と下降期

わち 8 月を境界に二分して、春から夏にむけての期間と夏から秋に向けての期間を気温上昇期および気温下降期とそれぞれ別個に取り扱うことにする。すなわち式 (9) の展開に当り、前者の期間につい

ては気温を正弦曲線、後者についてはピーク時を $t=0$ とした余弦曲線として別個に需要曲線を求めればよい。以下両期間をそれぞれ i, d とサフィックス表示する。先に求めた式 (11) は正弦関数状の気温に対応する増加需要曲線なので、サフィックス i を用いて次式のように書き改められる。なお T_0 は両期間を通じて共通である。

$$\left. \begin{aligned} Q_i(t) &= \left(-\frac{\alpha_{2i}}{\beta_{2i}} \right) \cdot T_0 \omega_i \cdot \left[\frac{x_i - y_i}{y_i^2 + \omega_i^2} \cdot e^{-y_i t} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{\omega_i} \sqrt{\frac{x_i^2 + \omega_i^2}{y_i^2 + \omega_i^2}} \cdot \sin(\omega_i t + \phi_i) \right] \\ \text{ただし、} \phi_i &= \tan^{-1} \left(\frac{y_i}{\omega_i} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x_i}{\omega_i} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(11)'$$

一方、夏から秋にむけての下降期では、式 (10) 同様気温は次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} T(t) &= T_0 \cos(\omega d t) \\ T(s) &= T_0 \frac{s}{s^2 + \omega d^2} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(12)$$

式 (11)' 同様に次の需要関数をえる。

$$\left. \begin{aligned} Q_d(t) &= \left(-\frac{\alpha_{2d}}{\beta_{2d}} \right) T_0 \cdot \left[\frac{y d^2 - x d y d}{y d^2 + \omega d^2} \cdot e^{-y d t} \right. \\ &\quad \left. + \sqrt{\frac{x d^2 + \omega d^2}{y d^2 + \omega d^2}} \cdot \sin(\omega d t + \phi_d) \right] \\ \text{ただし、} \phi_d &= \tan^{-1} \left(\frac{-x d}{\omega d} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{\omega d}{y d} \right) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

さて、式 (11) の気温上昇期では先に指摘したように、 $\phi_i=0$ より、十分条件として $x_i=y_i$ をえる。したがって、式 (11) は次のように簡略化される。

$$\left. \begin{aligned} Q_i(t) &= \left(-\frac{\alpha_{2i}}{\beta_{2i}} \right) \cdot T_0 \sin(\omega_i \cdot t) \\ \text{ただし、} x_i &= y_i, \text{ (8 月以前)} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(14)$$

式 (14) は式 (10) に表わされる気温変動に対し、需要が $(-\alpha_{2i}/\beta_{2i})$ という一定倍量の水量として誘発されることを表わす。

ここで、気温の上昇、下降両期に共通して 8 月のピーク需要水量を Q_p と表わし、(11)', (14) 両式の連続条件が必要である。上昇期からみれば、8 月のピーク時に、 $\sin(\omega_i \cdot t)=1.0$ となるよう ω_i が決定されるので、8 月のピーク需要水量 Q_p は式 (14) より次のように表わされる。

$$Q_p = \left(-\frac{\alpha_{2i}}{\beta_{2i}} \right) \cdot T_0 \dots\dots\dots(15)$$

一方、気温下降期に対する式 (13) より 8 月需要水量は $t=0$ により次のように表わされる。

$$\left. \begin{aligned} Q_p &= \left(-\frac{\alpha_{2d}}{\beta_{2d}} \right) \cdot T_0 \cdot \delta + Q_c \\ \text{ただし、} \delta &= \sqrt{\frac{x d^2 + \omega d^2}{y d^2 + \omega d^2}} \cdot \sin(\phi_d) = \text{const.} \\ Q_c &= \left(-\frac{\alpha_{2d}}{\beta_{2d}} \right) \cdot T_0 \cdot \frac{y d^2 - x d y d}{y d^2 + \omega d^2} = \text{const.} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(16)$$

ここで、式 (15) の Q_p と式 (16) の Q_p が同値であるための条件が必要であるが、 Q_c が 0 の場合と 0 でない場合に分けて次のように考える。まず最も簡単には $Q_c=0$ と考え、 $x_d=y_d$ の条件より式 (13) を次の式 (13)' のように考えて、ピーク需要水量の連続性から上昇期と下降期の需要特性は式 (17) のように変わると考えることができる。

$$\left. \begin{aligned} Q_d(t) &= \left(-\frac{\alpha_{2d}}{\beta_{2d}} \right) T_0 \cdot \sin(\omega d t + \phi_d) \\ \left(-\frac{\alpha_{2i}}{\beta_{2i}} \right) &= \left(-\frac{\alpha_{2d}}{\beta_{2d}} \right) \cdot \delta, \delta = \sin(\phi_d) = \text{const.} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(17)$$

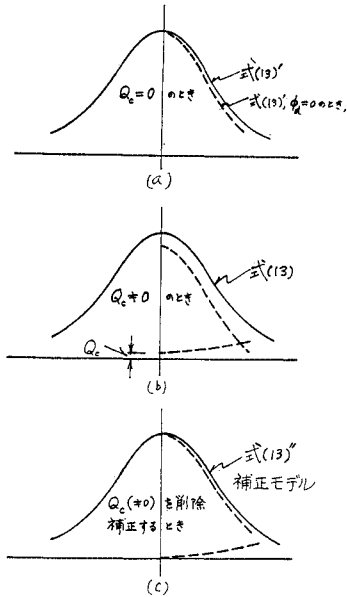


図-7 需要関数の構成補正の説明図

一方 Q_c が 0 でない場合、式 (13) と式 (14) の比較あるいは 図-7 の説明図からも明らかなように、下降期の需要関数のみに指数関数が現われる。これは需要意識にもとづく余裕水量あるいは節約水量の出現と考えられる。ただ、図-7 (b) に示すように 8 月の後半に発生する不連続性が不自然であろう。そこで Q_c が 0 でない場合の取り扱いとしては、需要の連続性を重視し、やや理論的妥当性を欠くが、図-7 (c) に示すように連続した余裕水量が発生するものとする方がより妥当であろう。すなわち、需要モデル式 (13) から Q_c を等しく削除、補正することにする。したがって、需要の補正モデル式として次の式 (13)'' をえる。また、式 (16) は式 (16)' となり、需要ピーク時における連続条件としては先の式 (17) と同一条件をえることができる。

$$Q_d(t) = \left(-\frac{\alpha_{2d}}{\beta_{2d}} \right) T_0 \cdot \left[\frac{y_d^2 - x_d y_d}{y_d^2 + \omega_d^2} (e^{-y_d t} - 1) + \sqrt{\frac{x_d^2 + \omega_d^2}{y_d^2 + \omega_d^2}} \cdot \sin(\omega_d t + \phi_d) \right] \dots (13)''$$

ただし、 ϕ_d は式 (13) に同じ。

$$Q_p = \left(-\frac{\alpha_{2d}}{\beta_{2d}} \right) T_0 \cdot \delta \dots (16)'$$

以上をまとめると、季節需要のモデルを次のように考察していることになる。三角関数状に変化する気温に対応して、気温上昇期には特に余裕需要を誘発することもなく、式 (14) に表わされるような需要がある。一方下降期には、図-7(a) あるいは (c) に示すように余裕のある需要意識が働き、需要に時間ずれあるいはさらに余裕需要を誘発したりすることになる。前者は式 (13)',

後者は式 (13)'' で表現され、当然各係数値の正負符号によっては余裕需要を節約需要として表現することが可能である。

(3) 季節需要の分析

以上の考察をもとに、都市における上水の季節需要の特性を分析する具体的な方法を整理しておく。ここでの分析の対象は春から夏、夏から秋にかけての需要増減期に限定され、現段階ではモデルの精度からみて特性の絶対値よりも相対的な特性差に注目するのが妥当であろう。

まず、各都市における β_1, β_2 値の定量化を主目的とし、水に対する価値意識の分析から需要特性を指摘したい。分析手法上の特徴として各特性値は先にまとめたように、式 (14) および式 (13)' あるいは (13)'' を活用して算定しうが、特に後者は需要の時間ずれ ϕ_d が存在するところから、分析は試行錯誤的に行なわざるをえない。

さて、分析手順は、要するに t を月単位の時間とし、各月の気温実績から T_0 および ω 値を求めるとともに、各式左辺に実績月需要水量を与え、各特性係数 β_1, β_2 および k, α_1, α_2 値を算定してゆけばよい。ただ、 k, α_1, α_2 値は求めんとする β_1, β_2 値と相対的な関係にあり、相互に影響をおよぼす。そこで各 k, α_1, α_2 値としては相対的な β_1, β_2 値の一つの比較基準値としてある種の値を適宜設定してもよいだろう。この場合、分析手順は比較的簡単になり、需要の上昇、下降両期それぞれに 2 時点の実績需要量を与えれば β_1, β_2 値を算定できる。それぞれ両期の 2 時点のうち、ピーク需要は共通するので、結局、図-8 に示すように上昇期スタート時点の需要水量とピーク需要量および下降期 1 時点の需要実績量から β_1, β_2 値を算定できる。各需要水量はスタート時点を 0 とし、他の 2 点はこれを基準とする増減量を用いてもよい。

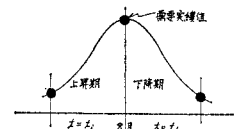


図-8 実績需要量の導入法

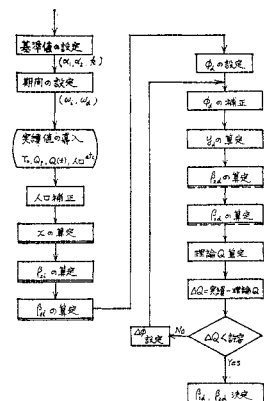


図-9 分析手順の一例フローチャート

上述の最も簡単な場合として、 k, α_1, α_2 を相対基準値として設定し、3 時点需要実績量から需要特性 β_1, β_2 を算定す

る試算錯誤の計算手順を一例として 図-9 のフローチャートにまとめておく。

3. わが国における需要季節変動の分析と考察

(1) わが国における需要実績の分析

以上に考察した分析法を用いてわが国諸都市における季節需要の実績を分析し、これまで特に問題にされなかった潜在的な需要特性を新たに探ってみる。また、そこに指摘される諸特性を経験的に判断し、妥当と考えるものであればとりあえずそれを先述モデルの一つの検証としたい。本来こういったモデルの検証を必ずしも十分とはいえないが、既存資料あるいはアンケートなどを含むこれまでの調査からはこのモデルを検証するに足る資料を得ることができないのでやむをえない。

さて、昭和 41 年 6 月から 10 月にかけてのわが国各都市別月別需要水量は一例として 表-2 に示すような実績であった⁴⁾。この間の給水人口の動向は各年度給水人口の変化から月別に比例配分することによってほぼ推定できる。また、各地域における気温実績も 表-2 に示すように求まる⁵⁾。ここで先の 図-9 に示した分析法を適用する。まず、2.(1).a) の 図-3 から相対的な特性の比較基準としてひとまず $\alpha_1=1.0, \alpha_2=0.5$ と設定することにす。また k 値については β_1, β_2 値との相対的な関係からここではある基準値を設定しておけば十分であろう。以下単に取り扱ひの容易さのみから、 $k=1.0$ と設定し、 k 値の持つ物理的な意味、すなわち暑さ感の需要への転換率を β_1, β_2 値に包含して表示する。したがって、以下の β_1, β_2 値は暑さ感が需要水量として具体化する際の全プロセスを通じての相対的な水に対する余裕意識を意味するものともいえる。今後 k 値の絶対値が他の調査から明らかになれば、同時に β_1, β_2 という需要意識の絶対的な値が明らかになり、その逆もまた同様である。

計算に用いる需要実績値は 図-8 に示すように 3 点でよいので、6 月 (上昇期 $t_i=0$)、8 月 (上昇期 $t_i=2$ 、下降期 $t_d=0$) の実績値と 9 月、10 月の平均値 (下降期 $t_d=1.5$) の計 3 点を用いることにす。この期間設定により ω_i, ω_d が求まる。需要実績値としては 表-2 に人口補正を加え、さらに 表-3 に示すように 6 月の

表-3 東京、大阪両都市における月別需要の変化量 $\Delta q(t)$ (表-2 より)

月	6 月	8 月	9 月、10 月平均
t	$t_i=0$	$t_i=2.0, t_d=0$	$t_d=1.5$ (月)
東京	0	78.3	41.2 (l/人・日)
大阪	0	111.6	47.1 (l/人・日)

単位需要量を基準に、それからの増減量 $\Delta q(t)$ を求めてこれを用いる。

さて、表-3 の各 $\Delta q(t)$ と先に設定した各定数および ω_i, ω_d を式 (14) および (13) に代入し、 $\beta_{1i}, \beta_{2i}, \beta_{1d}$ 、および β_{2d} を算出すれば、東京の場合それぞれ、0.8749、-0.0625、0.8971、-0.0926 を得る。これら各 β 値を式 (14)、(13) に代入してそれぞれの時点での理論 $\Delta q(t)$ を算定し、表-3 の実績値と比較したのが 図-10 である。同様に、大阪の場合各 β 値はそれぞれ 0.9239、-0.0381、0.9397、-0.0645 で、理論曲線と実績需要との比較を 図-11 に例示しておく。

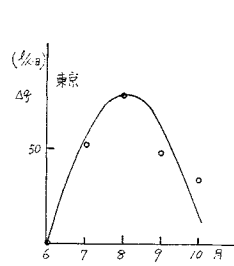


図-10 東京における需要の季節変動

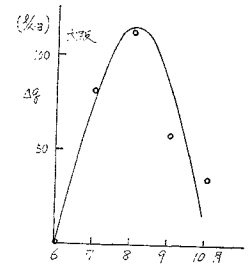


図-11 大阪における需要の季節変動

上の東京、大阪の例での β 値に関する分析結果が指摘しうる両者の需要特性について若干の考察を加えてみる。これまでの需要分析で諸判断の基準値としてきた平均単位需要水量 q を両地域について算定すれば、昭和 41 年東京 441、大阪 551 l/人・日で、大阪がやや余裕のある需要と想定しうる。本研究の表現では算定した各 β 値を用いて、式 (2) の h すなわち人々の水に対する需要意識は 表-4 に示すように上昇、下降両期の平均

表-4 東京、大阪における需要意識 (式 (2) の h)

	需要上昇期	需要下降期	平均値
東京	396*	416	406
大阪	506	523	514

* 計算例; $h_i=0.905 \times 440.5 - 0.047 \times 53.0 \approx 399 - 3 = 396$

表-2 東京、大阪両都市における気温と月別需要の実績^{4),5)} (昭 41 年)

都市名	給水人口 ($\times 10^5$ 人)	気温 (°C)			月別需要水量 ($\times 10^3$ m ³ /月)				
		6月	8月	10月	6月	7月	8月	9月	10月
東京	8102 (8025)	20.1	26.9	18.9	97768	109641	117718	108587	105904
大阪	3086 (3109)	22.0	28.7	18.4	51399	58890	61735	56729	54606

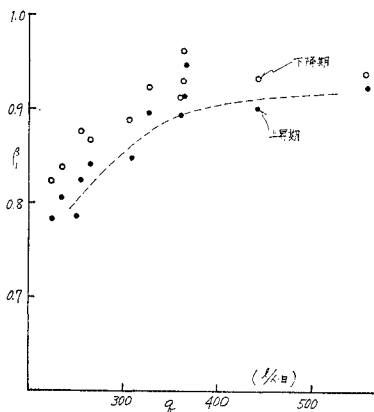
ただし、給水人口 () 内は昭和 40 年度

値として、東京 406、大阪 514 をえる。すなわち、大阪の方が東京よりも約 24% 余裕のある上水使用を行なっているといえる。なお、この h の試算では Q として $4q$ を、 $\left(\frac{dQ}{dt}\right)$ としては 6 月から 7 月、9 月から 10 月の $4q$ の平均変化率を代用している。また、上昇期と下降期における需要意識の変化をみれば、東京の場合 h は 396 から 416、大阪の場合 506 から 523 と変化し、下降期が上昇期に比べ東京では約 5%、大阪では約 3% 余裕が増大することがわかる。つまり平均的に余裕の少ない東京の方が同期の需要意識に大きな変化が現われることがわかる。なお、式 (2) からわかるように、需要意識 h は β_1 に起因する要因と β_2 に起因する要因の和として表現されるが、表—4 の計算例にも示されるように β_2 に起因する要因はほぼ 1% 弱である。いいかえれば、需要意識はその時点での需要水量に支配され、需要がいかに変化しつつあるかに支配される要因は現段階ではかなり少ないことがわかる。

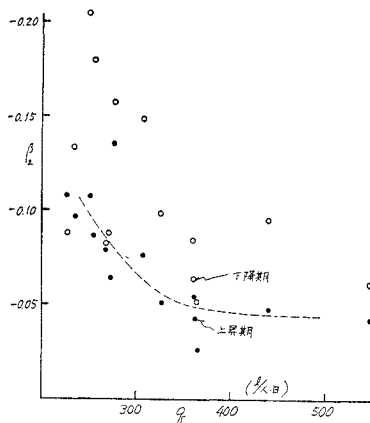
以上に例示したように各 β 値の算定によって、従来あまり問題にされることのなかった潜在的な需要特性を指摘しうることがわかる。

また、図—10、11 からわかるように下降期需要のうち、9 月の需要はいずれも理論曲線を下まわり 10 月は上まわる。他の地域に関する分析でもほぼ同様の傾向が指摘される。先の β 値の計算に当り、下降期については $t_d=1.5$ の 9 月と 10 月の平均需要水量をとった理由はここにあり、今後その原因など検討すべき問題として残される。

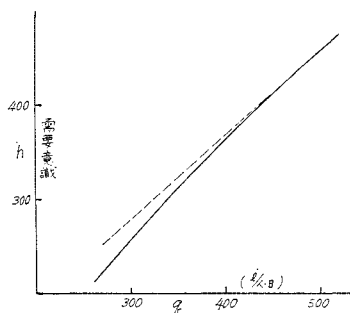
東京、大阪以外のわが国各都市の需要特性をも調べるために、わが国主要都市として 6 大都市および人口 5 万人以上の都市から任意に選定したいくつかの都市例について各 β 値を算定してみた。それぞれの地域における詳細な需要特性について述べることを省略して、全結果を単位水量 q と対比して図示したのが 図—12、13 であ



図—12 都市別需要における β_1 と q の相関



図—13 都市別需要における β_2 と q の相関



図—14 都市別需要にみられる需要意識 (h)

る。一つの明確な結果として、ほぼ $q=350$ $l/人 \cdot 日$ を境として需要意識に変化がみられる。つまり、350 $l/人 \cdot 日$ を下まわる地域では β 値の変化が顕著で、これを越えるとあまり変化しない。水道計画の基本となる需要水量の決定に当っては 350 $l/人 \cdot 日$ 以上の給水を行なう場合とそうでない場合には水道を使う際の潜在的な意識の一つの変化が現われることに注意が必要であろう。ただ、 h としての需要意識としては 図—14 にも示すように量的に大きく変化するとはいえず、現段階で需要意識を判断する目安としては q を用いておけば十分であろう。なお、ここでの h は上記検討より次式に近似し、図—12 中の破線から h' を算定して h に代用したものである。 h' は h と定義上異質なものであるが、相対的な変化の傾向は同一とみなしうる。

$$h \cong \beta_1 \cdot Q, \text{ あるいは } h' = \beta_1 \cdot q \dots\dots\dots (18)$$

以上は都市別需要実績の分析結果であるが、次に分析の対象をより拡大して都道府県別実績を取り上げてみる。以上と同様に各 β 値を算定して図示したのが 図—15、16 である。先の都市別需要に対して特に次の 2 点の差異を指摘できる。つまり、需要意識に変化が現われる境界が府県別の場合ほぼ 300 $l/人 \cdot 日$ 程度となり、先の約 350 $l/人 \cdot 日$ より 50 $l/人 \cdot 日$ ほど水量は減少す

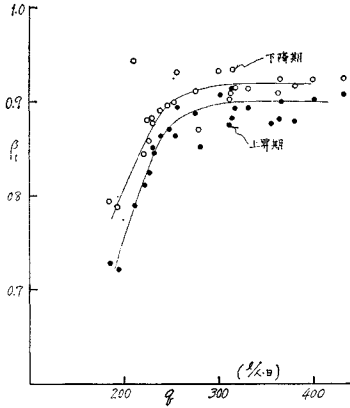


図-15 府県別需要における β_1 と q の相関

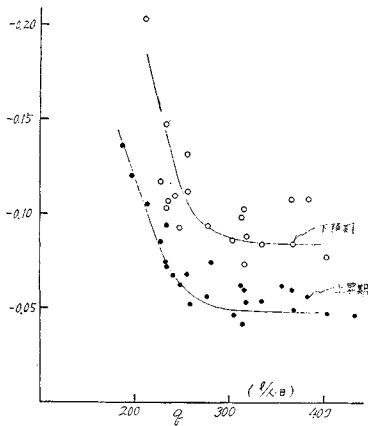


図-16 府県別需要における β_2 と q の相関

る。両者を比較して、都市域のように生活様式、経済力などが高水準と考えられる地域では、より多量の需要を当然と考え、節約意識などの需要意識が働きはじめる点はやや高いものと考えられる。また、もう一つの比較として、都市別の場合 β 値の分散が相対的に大きい。それだけ都市ごとに特性が異なると指摘しうるのである。ただ、その特性差を以上の分析だけで定量化するには精度上問題があり、2.(2) に示したモデルの適用限界を示しているのかもしれない。今後、モデルの適用限界を明らかにしてゆくことによって、各都市別の需要特性をさらに明確に定量化してゆくことができるので、ここではひとまず 図-12, 13 の分散は都市別需要特性の差異によるものだろうという推論にとどめておく。

(2) わが国における需要特性の考察

以上に示した実績値の分析ではいくつか興味ある需要特性を明らかにすることができた。そこで、前報までに示した都市上水需要の変動特性をも考慮しながら、さら

に考察を加えてみる。特に上水需要の長期的な変動、季節的な変動、さらには時間変動がそれぞれ需要者の水に対する価値意識によっていかに相互に関連があるかを考察してみる。

先の実績分析の結果によって、 β_{1i} と β_{1d} , β_{2i} と β_{2d} などの関係から結局近似的には、人々の需要意識は式(18)によって表現しうることが指摘した。つまり、 β_2 は β_1 に対しほぼ 1% 弱の影響しかもたず、 β_i と β_d とはそれぞれ数%の差異しかないことが東京、大阪の例などから明らかにされている。したがって、実用を考慮した近似式として、式(18)はさらに次のように気温上昇期の特性値のみによって表示することも可能である。

$$h \cong \beta_{1i} \cdot Q \text{ あるいは } h' \cong \beta_{1i} \cdot q \dots\dots\dots(19)$$

ところで、 β_{1i} の q との相関は 図-12 あるいは 図-15 に黒丸印にて与えられている。たとえば、都市別需要から算定した 図-12 の場合、図中破線にて示すように、一応両者の関係を次のように数式表示できる。

$$\beta_{1i} = 0.95[1 - e^{-0.01(q-50)}], (q > 50) \dots\dots(20)$$

したがって、(19), (20) 両式により q によって h' の平均的な関係を表示することができる。一方、各都市独自のそれぞれの年の需要意識を分析する場合は、 β_{1i} が季節需要実績から容易に算定しうるところから次の式(21)によって β_{1i} を算定すればよい。すなわち、式(15)の条件に式(8)および $x=y$ の関係を導入して次式をえる。

$$\beta_{1i} = \frac{1}{k} - \alpha_1 \left(\frac{T_0}{Q_p} \right) \dots\dots\dots(21)$$

つまり、 α_1, k 値が設定可能な場合、季節需要実績から需要ピーク値と気温ピーク値の比率さえ求めれば、上式より β_{1i} を求めることができる。

ところで、わが国各都市における平均的な需要特性に限れば、前報¹⁾で生活に不可欠な需要水量 q_1 と余裕水量 q_2 の近似的な比率 $m_1 (\cong q_2/q_1)$ には次の関係があると指摘している。

$$\frac{(1+m_1)^2}{k_1} = 0.0118 \bar{q}^2 - 0.0775 \bar{q} + 16.2 \dots\dots(22)$$

ここで、 k_1 は定数で \bar{q} は 1 人年間需要水量 ($m^3/人 \cdot 年$) を表わす。 \bar{q} を 1 人 1 日当り需要水量 $q(l/人 \cdot 日)$ にて表示すれば次のようになる。

$$\frac{(1+m_1)^2}{k_1} \cong 0.00157 q^2 - 0.282 q + 16.2 \dots\dots\dots(22)'$$

わが国における都市別の需要意識の特性係数 β_{1i} は q にて式(20)から算定しうるので、この関係を上の式(22)' に導入すれば次式をえる。

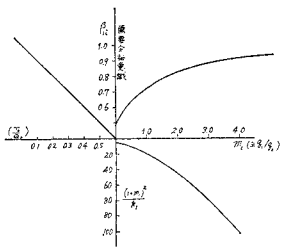
$$\frac{(1+m_1)^2}{k_1} = 15.7(\log_e(1 - 1.052 \beta_{1i}))^2 +$$

$$+12.5 \log_e(1-1.052 \beta_{1i}) + 6.02 \dots\dots\dots(23)$$

したがって m_1 値は β_{1i} にて次のように表わしうる。

$$m_1 = \sqrt{15.7 k_1 [\log_e(1-1.052 \beta_{1i})]^2 * + 12.5 k_1 \log_e(1-1.052 \beta_{1i}) + 6.02 k_1 - 1.0} \dots\dots\dots(24)$$

k_1 値を前報¹⁾と同様、ひとまず 0.2 と設定する場合、 β_{1i} と m_1 との関係は 図一17 の第1象限のように表わされる。



図一17 需要諸特性の相関図

m_1 とは先述のように生活不可欠需要に対する余裕需要量の比率を表わし、たとえば、 $m_1=0.9$ とは後者が前者の9割ということを指す。したがって、当然 m_1 値が大きければ大きいほど、余裕

ある需要意識に関する β_{1i} 値が大きくなり、その量的な関係が 図一17 に表わされることになる。また、各年独自の β_{1i} 値は式 (21) にて表わされるので、平均的なある年の実績 (T_0/Q_p) 値がわかれば、式 (21) の β_{1i} を式 (24) に導入して m_1 と (T_0/Q_p) の関係を与える。この関係が 図一17 の第2象限に併記される。したがって、図一17 より平均的な需要年の季節変動実績から (T_0/Q_p) を実測すれば需要の余裕意識、さらには余裕水量と不可欠水量を定量化できることになる。さらに、図一17 第4象限に示すように $(1+m_1)^2/k_1$ 値をもえるので、施設拡張あるいは料金値上げなどある種の条件変動に対する長期的な需要変動をも予測することが可能になる。また、その長期的な変動がいかに1日の時間変動に影響を及ぼすかについても前報²⁾の結果より予測できる。結論的にいえば、各種の需要予測あるいは需要特性の分析に当って、人々の需要に対する潜在意識を考慮する場合には、まず季節変動実績に注目して観測容易な (T_0/Q_p) 値を求め、図一17 のように m_1 値を算定し、余裕需要と不可欠需要とを推定して長期的な変動、時間変動の予測を行なえばよい。同様に 図一17 より需要の余裕意識を相対的に定量化してゆくこともできる。ただ、くり返し述べるように、現段階では各特性の定量精度に問題を残すので、さしあたっては1人1日当り需要水量 q 値を指標にしてそれぞれの特性を推定してゆく方がより現実的であろう。しかる後それらの結果の集積および分析を通じて 図一17 の定量精度を高揚してゆけば、新しい需要の分析・予測法が確立できよう。本文でその方向を示したものと考える。

4. おわりに

従来、需要量の予測・決定があらゆる水道計画の基本になるとはいえ、水源の豊富な段階でそれほど詳細な需要特性を把握しなくても一応の目安さえ決定することができれば、計画全般に特に問題を生じなかった。しかし、水源の質的・量的涸渇とともに用途別給水あるいは汚水の再生循環利用も議論される今日、都市上水需要はすべてに優先する生活必需品ばかりなのか、あるいはいかなる価値判断によって上水は使用されているのか、など根本問題を少しでも明らかにしておかなければ、論議はいずれも個人的な好みの問題に終始せざるをえないだろう。そこで、筆者は従来問題にされなかった潜在的な需要意識に注目し、特に季節変動の分析を通じて人々の需要意識にもとづく各種の需要特性を明らかにする方法および分析例を示してきた。以上から明らかになった具体的な結論を要約すれば次のようにまとめることができよう。

わが国における都市別および府県別需要実績の分析から 図一12, 13 および 図一15, 16 に示すように、需要意識を表わす特性が1人1日当り平均需要水量に密接に関係し、府県別の場合ほぼ 300 l/人・日、都市別の場合 350 l/人・日 を境に需要意識は変化することを指摘した。需要量の変化の状態に起因する需要意識 (β_2) は、需要量自体に起因する意識 (β_1) に比べ相対的に小さく、近似的には式 (18) に示したように比較的簡単に需要意識を定量化しうることを示した。一方、各年独自の需要意識は8月の気温と需要水量 (T_0/Q_p) によって表現しうることを示し、この意識と前報¹⁾で取り上げた m_1 値との関係を明らかにした。つまり、余裕需要 (q_2) と生活に不可欠な需要 (q_1) との比率 m_1 を 図一17 に示したように (T_0/Q_p) 値によって推定し、近似的にはあるが一つの定量化を可能にした。さらにまた、 m_1 値の定量化はすでに明らかにしたように、施設拡張あるいは料金値上げなどの水道計画全般におよぶ諸対策の効果を予測可能にするので、一連の本研究成果が今後の水道計画に示唆しうる効果は少なくないと考えられる。ただ、大胆な仮定、設定をとり入れていることに対する検証が現段階では必ずしも十分とはいえない。現在利用可能な資料にも多くの限界があるので、可能な限りの検証を加えて一応の妥当性を示したものの、精度の高い定量的な結果を得るには至らない。したがって、本研究成果は、1) これまでほとんど未検討に残されてきた水の価値意識にもとづく特性の解析法あるいはその方向を提示したこと。2) その重要な諸特性を一応わが国諸地域について定性的に明らかにし、相対的な比較を可能にし

たこと。3) その特性を1人1日当り平均需要水量にて推論しうることを示し、これまでの水道計画と関連づけたこと。4) 季節需要のうち、8月の気温と需要量の比率から人々の需要意識を推定しうることを示唆し、ひいては余裕需要と不可欠需要の定量化を可能にしたこと。5) これらの新たな諸特性を今後の水道計画にいかにか活用しうるかを例示し、その効果をも示しえたことなどにとどまる。これらの諸成果を具体化し、諸特性を十分な精度で定量化するためには今後多くのケーススタディを必要とするが、その際収集すべき新たな資料および検討すべき事項などはすでに本文中各所に明らかにしているので、今後の分析が期待される。

最後に、一連する需要変動の分析研究に当り京都大学工学部衛生工学教室 末石富太郎教授より多大の助言をえたことを付記し、ここに感謝の意を表す。

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，158，昭 43.10
- 2) 住友 恒：同上——需要の時間変動の分析——，土木学会論文報告集，192，昭 46.8
- 3) 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 44.1
- 4) 日本水道協会：上水道統計，昭 41，昭 42
- 5) 気象庁観測部統計課：気象庁年報，昭 41，昭 42

(1971.6.12・受付)