

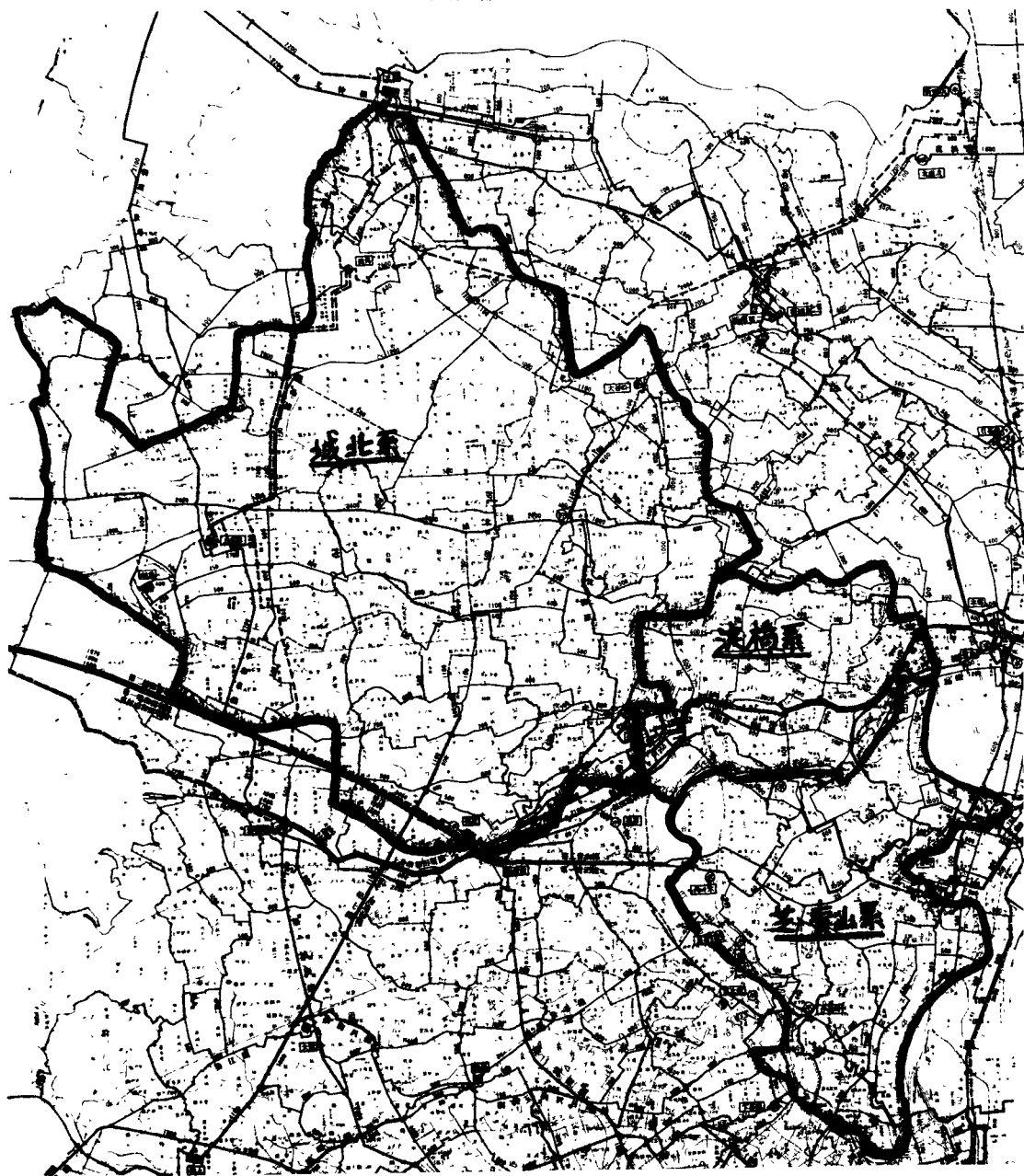
(25) 配水系統の水圧不均等と水の効用性の評価

国立公害研究所 合田 健

1. 配水主管網の節点余裕水頭

口径400mm以上の配水主管で構成される管網は、配水系統の動脈であり骨格である。その動特性がすなわち配水系統の機能をあらわしている。主管から分岐する支管・給水管網にはふつう増圧所は存在せず、高層ビルの場合は地下貯槽から屋上給水槽への揚水が行われる。

図-1 東京都の三配水区と幹線



配水主管網における、計画給水条件下での各節点の水頭分布、とくに有効水頭の分布が重要である。その過大や過小はもとより避くべきだが、有効水頭の均一性もまた重視すべき点の1つである。有効水頭は水頭損失を差引いた残存水頭と地盤高の差であるが、通常円滑な給水や消火のため、管網では最低有効水頭として20mが必要とされている。現実の配水主管網における有効水頭の均一性がどのようなものか、例を東京都水道の淀橋系、芝・青山系および城北系の三配水区の場合にとってみる。

図-1はその配水管系統、管径（mm）のほか、給水所、増圧ポンプ、圧力調整所等の位置を示している。これら三配水区をとり上げたのは、付随している配水小管、給水管を無視した主管による管網数が、淀橋系で13、芝・青山系で18、城北系51で、水圧分布に及ぼす管網数の影響をみるべく、有効水頭あるいは余裕水頭を独立情報と仮定した場合、そのエントロピー値の管網数による変化傾向がうかがえるだろうということである。東京都水道局計画部による管網計算は主管網のみについて行っており、流出入流量は、配水区境界における流出入条件のほか、分担配水区域分の必要流量がすべて関係節点に集中されていると仮定していることはいう迄もない。表-1はその例であるが、31節点それぞれについて東京都が求めたのは、残存水頭、地盤高、有効水頭値である。これに対し余裕水頭値（有効水頭-20m）を求め、そのヒエラル

表-1 淀橋系各地点残存水頭、有効水頭および余裕水頭のクラス

記号	残存水頭	地盤高	有効水頭	余裕水頭	級	記号	残存水頭	地盤高	有効水頭	余裕水頭	級
1	7 1.9 m	+ 3 5m	3 6.9 m	1 6.9 m	9	1 7	6 8.3 m	+ 1 8m	5 0.3 m	3 0.3 m	16
2	6 7.5	+ 3 1	3 6.5	1 6.5	9	1 8	6 8.5	+ 2 7	4 1.5	2 1.5	11
3	6 7.9	+ 2 9	3 8.8	1 8.8	10	1 9	6 2.4	+ 2 4	3 8.4	1 8.4	10
4	7 0.8	+ 3 8	3 2.8	1 2.8	7	2 0	6 8.6	+ 2 7	4 1.6	2 1.6	11
5	7 0.9	+ 3 8	3 2.9	1 2.9	7	2 1	6 8.4	+ 1 6	5 2.4	3 2.4	12
6	7 3.4	+ 3 8	3 5.4	1 5.4	8	2 2	6 9.4	+ 3 5	3 4.4	1 4.4	8
7	7 4.5	+ 4 2	3 2.5	1 2.5	7	2 3	6 8.3	+ 1 8	5 0.3	3 0.3	16
8	7 5.2	+ 4 2	3 3.2	1 3.2	7	2 4	6 9.7	+ 3 5	3 4.7	1 4.7	8
9	6 5.8	+ 2 9	3 6.8	1 6.8	9	2 5	6 9.4	+ 3 5	3 4.4	1 4.4	8
1 0	5 5.2	+ 1 6	3 9.2	1 9.2	10	2 6	6 7.2	+ 3 5	3 2.2	1 2.2	7
1 1	5 3.5	+ 1 1	4 2.5	2 2.5	12	2 7	6 3.8	+ 2 9	3 4.8	1 4.8	8
1 2	5 7.4	+ 3 8	1 9.4	- 0.6	1	2 8	5 9.7	+ 2 9	3 0.7	1 0.7	6
1 3	6 2.7	+ 3 6	2 6.7	6.7	4	2 9	6 8.3	+ 1 6	5 2.3	3 2.3	17
1 4	5 7.3	+ 2 4	3 3.3	1 3.3	7	3 0	7 5.5	+ 3 5	4 0.5	2 0.5	11
1 5	5 4.6	+ 5	4 7.4	2 7.6	14	3 1	7 2.6	+ 4 7	3 0.5	1 0.5	6
1 6	6 1.7	+ 5	5 6.7	3 6.7	19						

キー表示を、0～2m……1、2～4m……2、……………46～48m……24、48～50m……25のごとく示した。表-1の右端がそれである。

芝・青山系配水区の57節点、城北系配水区の99節点についても同様な作表をしたがそれらは略する。結果として、淀橋系では余裕水頭の階級指数の最低が1、最高が19であったのに対し、芝・青山系では最高が22で、19以上の節点が8個ある。また城北系ではほとんどの節点が指数3～12に集中している。これはのちに多様性指数（情報エントロピー）の計算の際にも述べるが、城北系は配水区が広い割に、境界に隣接する幹線も含めて増圧点の数が少ないことが一つの特徴である。対照的に芝・青山系配水区は土地の高低差があり水頭差はかなり大きい。しかしながら、これら三配水区を横浜市や神戸市の場合と較べれば、むしろ全体に平坦である。

2. 余裕水頭の不均一性——多様性指数値

余裕水頭をそのまま度数グラフにしてあらわすと図-2, 3, 4のようになる。

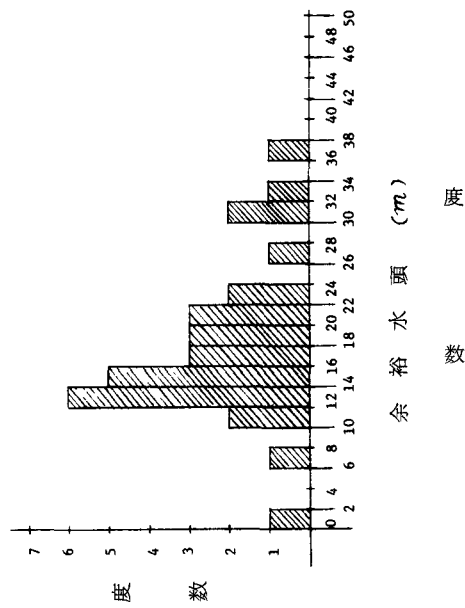


図-2 余裕水頭指数の分布
(1) 淀橋系

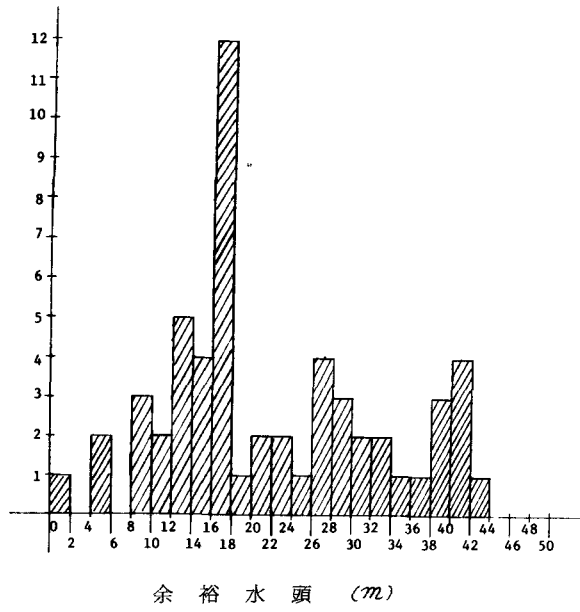


図-3 余裕水頭の分布
(2) 芝・青山系

淀橋系配水区は節点水頭が多少ばらついているものの、有効水頭10～22mのmoderateなゾーンにほぼ集中している。ところが芝・青山系では、57節点のうちこの10～24mのゾーンに入るものは28節点で、全体の半分に満たず、一方余裕水頭30m以上の、いわば高压に属するものが14点、約四分の一を占めている。一方城北系配水区をみると、99節点のうち、余裕水頭10～24mのものの割合が70%を占め、30m以上の高压節点は2個にすぎない。このように、配水区の大小とは必ずしも関係がなく、むしろ逆のバターンの水圧分布が得られるのは、地形の平坦さや増圧ポンプ等の分散状況、管網形状にも関係があると考えられる。とりあえず、この水圧分布の不均等性を評価する尺度として、情報エントロピーに該当する、ヒエラルキー指数の多様性 (diversity index, DI) を求めている。情報エントロピーの計算対象量には離散量である方が都合がよいのであるが、現実の管路の形状や節点間の管路長にはほとんど規則性がなく、人為的に多様な形式をとっているので、母分散をかりに離散型

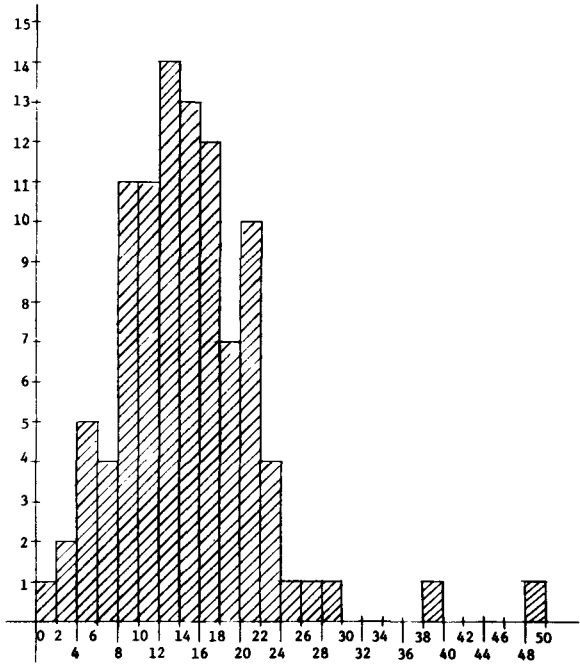


図-4 余裕水頭の分布 (3) 城北系

とみてDIを求めてみる。

$$DI \text{ (情報エントロピー)} = - \sum_i P_i \log_{10} P_i \dots\dots\dots(1)$$

P_i : 節点の余裕水頭に応じ、0～2mクラス1 ($i=1$)、2～4mでクラス2 ($i=2$)とした場合の、 i の出現頻度(確率)、 $i=1, 2, \dots\dots\dots 25$ まで(このケーススタディではそうだが実際はもっと大きい数字になりうるし、階級のつけ方も自由である)。

度数分布グラフ図-2, 3, 4からエントロピーを求めると図-5のようになる。本来、管径や管網規模に大差がなければ、D

I値は管網数あるいは節点数に応じてある規則的な変化を示すことが予想されるが、この場合はそうでなく、芝・青山系(DI=1.873)と城北系(DI=1.888)にほとんど差がなく、低い値の

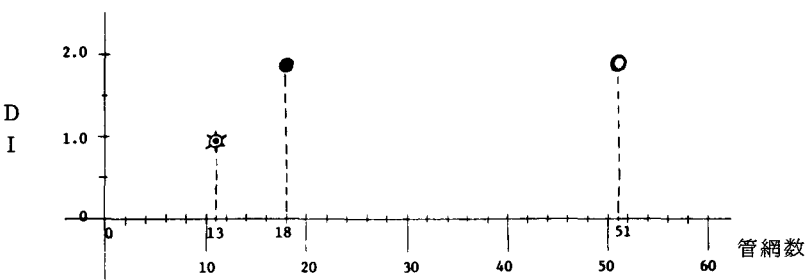


図-5 三配水区の管網数に対応する水圧分布のDI値

淀橋系(0.942)と著しい対照を示している。城北系のような大規模管網であっても、かりに余裕水頭値が定まったゾーン、例えば $i=10$ (余裕水頭18～20m) にすべて入る、いわゆる等圧型であるならば、DI=0で、それが図-5の原点に当たることを考えると、芝・青山系の場合の水圧不均等は少し異常であるといえないか。もっとも前述の通り、広地域の城北系が、管網規模の割に平坦で増圧点の数も少ないことを考慮する必要はあろう。

ここで情報エントロピーの意義を考えてみると、配水圧を象徴する有効水頭値が均一化に近づくほどその値は小さくなり、一方、配水区域が広大になり水頭値が分散すればするほど大きい値となる性格をもつ。つまり配水系の組織設計において低エントロピー化をはかることは、従来からしばしばいわれた等圧化を実現することであり、これを砂のふるい分けに例えるならば、自然産の砂の粒径がまちまちなのを、フルイによって均等

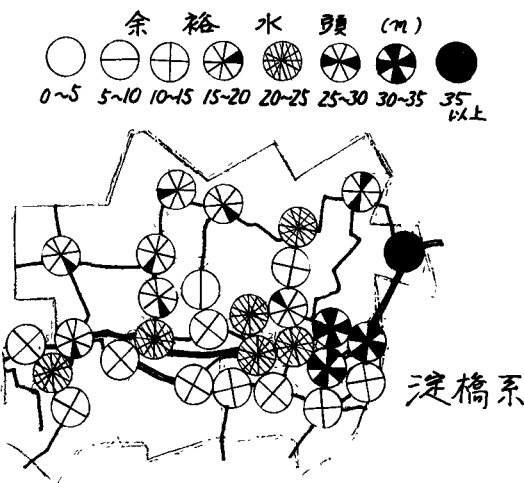


図-6

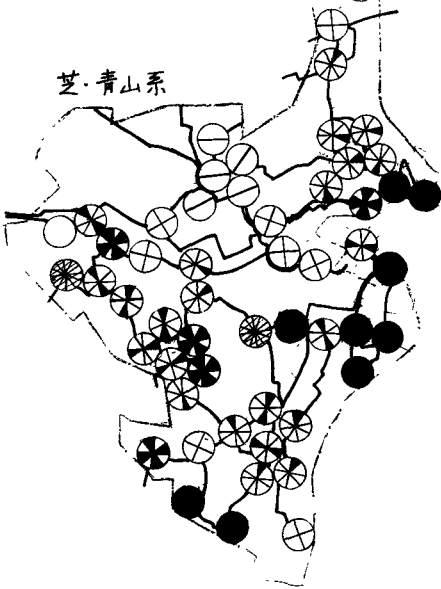
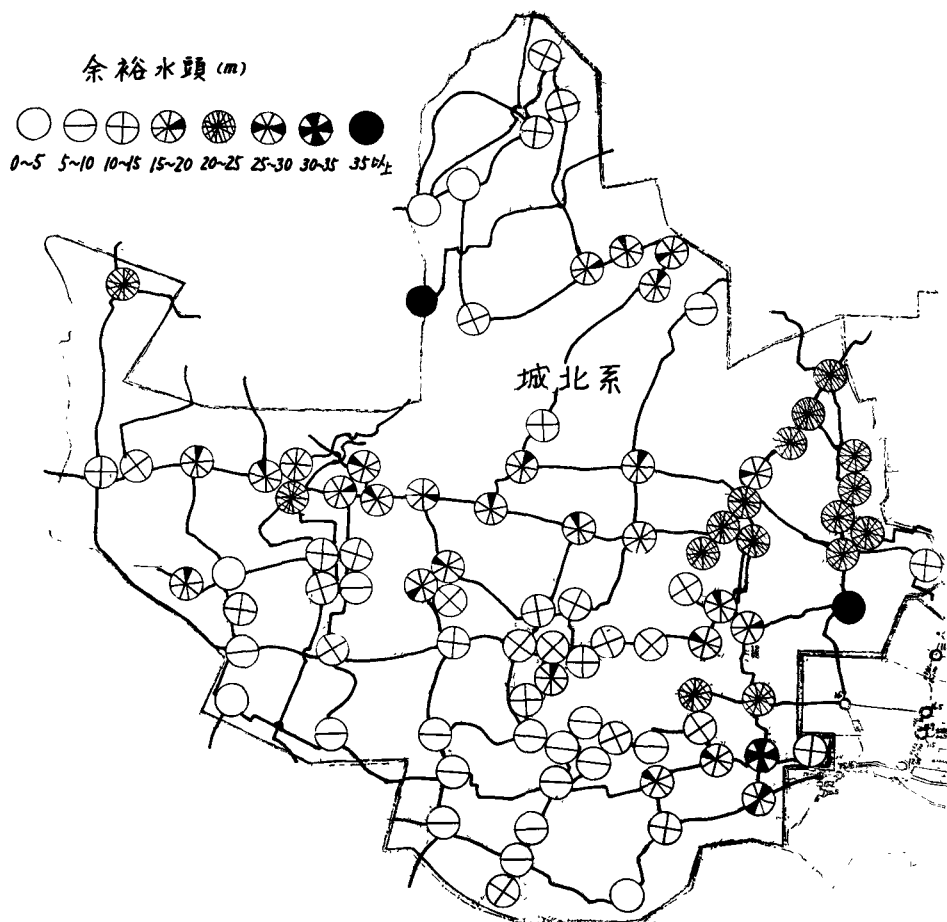


図-7

度の高い粒
の揃った砂
のみに分離
することに
該当する。

配水系にと
って低エ
ントロピー
化は必ずし
も難しいこ
とではなく
て、例えば
図-8に見
る通り、配
水区のかなり
の区域にお
いてそれに
近い状態が
実現してい
る。それは
偶然にでき
たのではなく
、地形と、
本管埋設
ルートが

図-8



比較的規則正しく、また主管々径にあまり差がなかったことが有力な理由である。配水管水圧分布の均等性の実現の条件を追究するには、同じ東京都の他の配水区、また他の都市の様々なパターンの配水区について、区域の広狭を問わず、節点の有効水頭を離散情報とする多様性指数を同時に求めて、条件、状況を比較検討することが必要であり、大いに意味があると思う。筆者の手もとにはそうした十分な資料がないが、各都市水道の技術者や研究者がそれらのデータを持ち寄りさえすれば、後の作業は比較的容易で、おそらく興味ある成果を生むであろう。そして配水系統組織設計、あるいは水圧管理技術にかなり役立ちうるものと思われる。

3. 漏水の問題について

主管網でも、余裕水頭30m以上(有効水頭50m以上)の部分は、火災に対しての条件はよいが、漏水に対して不利な条件と通常考えられている。ことに有効水頭が70m以上は、夜間に水圧がより上昇するなど管網流水条件が変わることも考えれば、管の材質と規格からして危険だといえる。しかし、対象とした三配水区ではそのような部分はほとんどない。メカニカル接手の場合、繰返し荷重、振動に対しての耐力が強く、東京都水道局の場合、本接手による主管網での漏水はむしろ少なく、問題は配水小管、給水管にあるという。最近のタイトン接手はかなりの耐力を有するようであるが、まだそれほど普及していないから、配水支管組織、給水系統にはかなりの漏水があると見ねばならない。漏水に関しての雄倉の発表(昭41、漏水量と水圧との関係、第17回水道研究会)と東京都水道局漏水防止課の調査(昭50.1.2~51.3)とから、

一つの示唆が得られる。すなわち、漏水量 q はベルヌイの式であらわせるとして、 $q \propto \sqrt{p}$ 、 p は管内静水圧という考えかたが支配的であったが、雄倉は大阪市内の配水支管の止水栓までを対象とし、75 mm 径以上の鑄鉄管と石綿管の延長 100～300 m を対象にして得たデータから

$$q = C \cdot a \cdot h^{1.15}$$

を得ているが、これは水圧 0.3～5.0 kg/cm^2 の範囲のデータを最小二乗法で処理して得たものである。しかし、データのうち水圧 1～5 kg/cm^2 のものに絞ると、 h の指数は 1.15 より低い値になるように見える。しかし、0.5 という指数では明らかにこの実験値を説明することができない。一方、東京都では、比較的水圧の高い板橋区坂下、蓮根地区で、平時の平均水圧が 6 kg/cm^2 あるのを、水圧制御によって、4 kg/cm^2 、2 kg/cm^2 に調節し、それぞれの場合の漏水量を調べたところ、圧力変化の影響はやはり 0.5 乗ではなく、単に指数のみを見たところでは、雄倉の 1.15 より少し高い結果となっている。このように指数が見かけ上 0.5 より高くなるのは、漏水孔形状および断面積に係わる係数 ca が圧力によって一定値でないこと、また、漏水現象は一種の地下浸透現象であるため、雄倉が考察でふれているように浸透水量が動水頭の 1 乗に比例するダルシー法則と無縁ではないと考えるのが妥当であろう。

4. 水の効用性指数の提案

水道における水の効用性は、水量、水質、水圧の三要素が関係する。この三要素は従来、それぞれ独立に考えられ、数量的に結びつけられることはなかった。しかし、水の効用をつきつめると結局、天与の、あるいは人為的に付与した負のエントロピーの大きさがそれに他ならず、上の三要素の相乗積が一つの意味をもつと考えられる。この場合、水量と水圧とはおのおの一つの単位で表現でき、それらの積を求めうるが、水質は別で、多くの因子が係わりそれぞれが性格も単位も異なるものだから、相乗積で効用指数を求めるためには、先ず水質因子の選択をすること、次に、安全性に直接係る因子を別格の制約条件とし、他の各因子は同レベルのものとして列ベクトルを構成し、構成因子おのおのに効用からみた grade 表示をすると都合がよい。そうした grade 表示は水質関係因子のすべてについては難しいし、また grade 表示が主観的なものになり易いことは今は已むをえない。そこで以下、1) 三要素の相乗積の定義、2) 水質因子の列ベクトル構成、3) 効用性からみた水圧値の段階的評価、を提案する。断わっておくが、これはまだ理念の段階で、実用へはなお幾多の議論や考察が必要であり、以下の数量的表示はすべて例示の域を出ない。

水道における水の効用性指数 (Utility Number of Water Supply)

$$UNW = [\text{水量}] \cdot [\text{水圧}] \cdot [\text{水質}] \quad \dots\dots\dots(2)$$

水量は、水道システム任意点……各種管または施設における流量 (m^3/sec) の数値をそのままとる。

〔水量〕の指数 = システム任意点の流量 Q

つぎに水圧については、例えば

$$\begin{array}{ll} P_{\max} \leq P \leq P_{\min} & \text{に対し、} \quad [\text{水圧}] \text{の指数} = \text{一定値 (例えば 10)} \\ 0 \leq P \leq P_{\min} & \text{に対し、} \quad " \quad " \propto P^m \quad (0 \sim 10 \text{ の値をとる, } m \text{ は指数)} \\ P_{\max} > P & \text{に対し、} \quad " \quad " \propto P^{-n} \quad (" \quad " \quad , \quad n \quad ") \end{array}$$

また $P < 0$ の場合は指数は 0 とする。これまでの議論により、例えば P を有効水頭にとるなら、 $P_{\max} = 7 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 、 $P_{\min} = 2 \text{ kg}/\text{cm}^2$ である。

次に水質の指数を次の四種の列ベクトルと制約因子 C_* の積であらわしてみる。

$$[\text{水質}] = \underset{\substack{\mathbf{q} \\ \text{物理的} \\ \text{因子}}} {\mathbf{q}} \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \underset{\substack{\text{化学的} \\ \text{因子}}} {\mathbf{C}} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \underset{\substack{\text{生物的} \\ \text{因子}}} {\mathbf{B}} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \underset{\substack{\text{心理} \\ \text{情緒} \\ \text{因子}}} {\mathbf{E}} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \\ \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \text{制} [\mathbf{C}_*] \text{約因子}$$

列ベクトルの構成因子は例えば次のようである。

P_1 : 濁度 C_1 : PH B_1 : 一般細菌数 E_1 : 臭気濃度 (TO)
 P_2 : 色度 C_2 : $KMnO_4$ 消費量 B_2 : ウイルス (PFU) E_2 : 味 (TT)
 P_3 : 蒸発残留物 C_3 : $NH_4 - N$ B_3 : AGP E_3 : 透明度 (Tr)
 P_4 : DO C_4 : $NO_2 - N$ E_4 : 温度

なお C_* は、Hg, Cd, C^{P+} , A_8 , 大腸菌群数等の健康阻害因子群をあらわし、いずれも飲料水基準値以内なら1の値をとり、どれか基準を外れておれば0となる。

物理、化学、生物、心理情緒の各因子から例をとって、grade 指数をきめるやりかたは、おそらく次のようなものであろう。

$E_x - 1$, P_1 (濁度) の場合：最善の状態を指数10と評価し、度数がふえるに従い減少させる。

0 ~ 2 指数10, 2 ~ 5 9, 5 ~ 7 8, 7 ~ 10 6

〔備考〕 米国基準では1以下、ユーゴスラビア基準では10以下である。

$E_x - 2$, C_1 (PH) の場合：

6.8 ~ 7.2 指数10, 6.5 ~ 6.8, 7.2 ~ 7.5 9, 6.0 ~ 6.5, 7.5 ~ 8.0 8, 5.8 ~ 6.0, 8.0 ~ 8.6 指数7, 5.0 ~ 5.8, 8.6 ~ 9.0 5 ; ただし、PH値が7から外れている原因が明確な場合は指数値を当然変えてよい。

$E_x - 3$, B_3 (AGP) の場合：

0 ~ 5 (貧栄養湖に相当) 指数10, 5 ~ 10 (中栄養レベル) 9, 10 ~ 15 (やや富栄養) 8, 15 ~ 20 (かなり富栄養) 7, (100 ~ 150 0, 処理下水に相当)

$E_x - 4$, E_1 (TO) の場合：

0 ~ 5 指数10, 5 ~ 10 9, 10 ~ 15 8, 15 ~ 25 7, 25以上 5以下

水質因子のどれをとり、どうgradeをつけるか多くの議論があろう。また当然のことながら、 C_* の水銀、カドミウム等の健康阻害因子は、どれかが基準値を超える場合、因子全体が0となり、(2)式のUNW値もそのため0となってしまう。もし飲料水判定基準に全く抵触せず、また、物理、化学、生物等の水質因子が最上のgradeに属し、しかも水圧が最適ゾーンにあれば

$$UNW_{\max} = 10 \cdot Q_{\max} \cdot Q \quad \dots\dots\dots (3)$$

という最高値をとることになる。問題なのは、水量、水圧に対する水質因子のもつ相対的の重みであるが、今は適当な criteriaがない。

筆者が主張するのは当面、(2)式であらわされる負のエントロピー思想を、水道にしろ工業用水にせよ、水の効用性評価に用いることである。上水道にも種々形態のものがあるが、水源から給水末端に到るシステムを、例えば図-9のように示せば、上述のUNW値はおおよそ黒丸の大きさを示すような変化を示すであろう。図に示す黒丸は、5種類のシステムでいずれも同じ最大値をとるよう示してある。換言すればこれが「水資産総額」にあたるもので、それが減少するのは、水の消費によるのみでなく、汚染、漏水、事故等にもよる。注意すべきこととして、(1)いまの水道料金が基本料金以外はおおよそ水量のみに比例して加算されることで、そういう経営上の常識に対して、事業者がサービスする水の効用性をよりトータルに評価する必要があること、(2)UNWは一応(2)式で定義したが、別に消費者サイドからみれば必ずしも〔水量〕・〔水圧〕・〔水質〕の三重積の形でなく、水圧×水質の二重積でも意味をもつ、と考えられる点である。

要するにUNWを(2)式のように定義したのは、水道「事業」がつくり出したもの、失ったものをより科学的に評価しようとした提案である。

5. 結言

1) 1~3のまとめとして、水道の配水システムでの水圧不均等性を東京都の三配水区を例にとって解析

し、DI値という見方を通していくつかの新知見をえた。同様な分析検討を多くの都市の配水区について行えば、基本管網設計や水圧管理の合理化に資することができよう。

2) 水道における水の効用性指数 (UNW) を提案した。これはまだ議論の余地が多いけれども、蓄積された負のエントロピーの消費という新たな見方があること、その具体化に向けての第一歩である。

なお、東京都水道に関する諸資料をご提供下さった東京都水道局に深謝の意を表する。

図-9

効用性指数変化の概急図

[取水・導水・浄水・送水・配水系統の profile]

