

## 衛生工学

合 田 健\*

## 1. あらまし

ここでは主として上下水道および水質保全に関することを述べることにしているが、元来、衛生工学の範囲はこれに止まらず、放射線の防御、汚染監視、ばい煙、有毒ガス、騒音などの公害対策、空気調整、汚物処理など多岐にわたる。したがって、電子計算機の応用面も当然広いのであるが、その応用開発ということになると一様なテンポで進んでおらず、分野によりかなり差がある。一つの特徴として、水処理や空気調整のように、プロセスとして初めて機能を発揮するものが多いので、それらを個々の単位操作として、およびプロセス全体として制御するため、計装管理面での電子計算機利用が将来大きいウエイトをもつと考えられる。この分野について論ずるだけでも相当な内容になるであろうが、セメント製造のような場合とは異なり、大ていはその物理、化学、生物学的な反応機構、物質収支関係の複雑さのために、まだ応用性十分という段階に達しないか、あるいは試行開発の途中であり、筆者は残念ながらそれについて詳論する任ではない。ここでは、おもに上下水道、水質保全技術を中心として電子計算機応用のアウトラインを記してみよう。

上記の分野での電子計算機の応用面はつぎのように分類できる。

## (1) 水理計算

等しく水理計算といっても、計装面に用いる場合はフィールドバック系の要素として行なうことが多いから、じん速な計算を要するのに対し、管網計算のように計画設計用、または照査用が主である場合は、計算が早いに越したことはないが、極端なじん速化よりは便利さ、経費などが問題である。総括して応用可能な対象をあげてみると、送配給水施設においては、まず、与えられた配

水管網に対する流量配分、圧力分布の計算（いわゆる管網計算）、最適化問題としての管網要素決定、すなわち、与えられた計画配水区域に対して、いかなる管網配置がもっとも経済的か、あるいは等圧化が可能であるかの答を出す問題とがある。この後者の問題は、プログラミングの典型的な問題であるだけに必然的に電子計算機利用と結びつくのであるが、現在はまだ研究の段階である。

つぎにポンプの遠隔運転におけるポンプ容量制御があり、これは諸所ですでに実施されている。一方浄水場では、洗浄排水トラフの水理計算や多孔管型集水装置の洗浄均等度計算などに実用されつつある。その他法則が確立して数値積分型、多元連立方程式型、あるいは逐次追跡計算型の式を用いる問題には大てい効果的に用いることができるが、それほどまだ実用化されていない。また、流量や水位などの計測データの処理、管理日報の作製なども対象になっている。要するに上水道工学における水理計算面での利用は、現在において、衛生工学におけるもっとも重要な計算機応用分野と考えられる。

これに対し下水道では、ヘズン・ウィリアムズ公式をマンニング公式におき変えた下水きょ網の水理計算や、終末処理場の計装管理に関し、上水道におけると同様に応用分野が存するはずであるが、実はまだそれ以前に検討されるべき処理反応機構などが未詳のまま残されており、応用面でのウエイトは低い。しかしながら、雨水流出量計算において、シカゴ方式のような追跡法が用いられるとすれば、地表面、側溝、管きょなどの貯留閘数を媒介とする逐次計算は、これまでの合理式などところがって計算機に縁の深いものであり、その利用による計算の能率化によって将来の発展が予期される問題である。

## (2) 水処理、水質保全

強制沈殿、化学的水質調整において、硫酸ばん土注入やpHコントロールが計算機制御の対象となっているが、まだ単位操作制御の段階である。将来プロセスとしての最適化制御が当然目標とされねばならないが、これには基礎研究がまだまだ必要である。

## (3) 構造計算

一般の土木構造物の設計と全く同じで、上下水道施設としては槽状の地下、半地下構造物や塔状構造物、水管橋などの設計計算が主たる対象であろう。現在、上下水道施設の実施設計では、案外構造計算にさく時間と労力

\*正会員 工博 京都大学教授 工学部衛生工学教室

が大きく、機能設計や経済設計に十分な余裕がないかに見受けられるが、これは残念なことで、機能や経済性の検討を十分行なう必要上からも構造計算をできるだけ計算機などで能率、簡素化すべきであろう。

#### (4) その他

公害対策、原子炉の安全管理、空気調整などに関して知見が乏しいため多くを語るができないが、たとえば煙突からの放散物質のきょ動を知るため、Suttonの三次元的な拡散率公式の実際計算や、地下に流注処理された放射性物質の地下水による輸送と、土壌への吸着に関する抑留ならびにイオン交換率計算などは法則が一応確立しているので、電子計算機利用の対象となろう。一方、脱湿、脱塵装置の最適設計、プロセス制御なども当然、対象とすべきであるが、たとえば脱塵装置の場合、エアロゾル粒子の入力スペクトルに対して脱塵機の性能、すなわち応答特性が、数学モデル化によってもまだ明確化されていないため、別な入力に対する応答を確認できない、といった計算機利用以前の問題があるようで、専門研究者に聞くところでは、それはそれとして最適の数学モデルを検討する過程において、電子計算機の利用が必須であると考えられている。

なお、以上の用途には、デジタル型とアナログ型の両型が利用されるわけであるが、その選択は対象と目的による。たとえば管網計算の場合、定まった規模配置の管網に対してはアナログ型が特長を発揮するのに対し、最適化問題として考える場合はデジタル型が都合がよい。

## 2. 上下水道における実用例

将来は利用可能という問題をさらに検索することは別の機会にゆずり、国内外で実用されているものからをえらんで概略をのべる。

### (1) 配水管網の問題

計算機利用の歴史も古く、1949年Perry<sup>1)</sup>やMcIlroy<sup>2)</sup>らによって最初のアナログ型計算機が実用の段階に入った。アナログ型計算機は量的関係が数式で確立していて、それが電気回路に具現できるような場合適用可であるが、管路流に対してはヘズン・ウィリアムズ公式が基礎となっており、管網節点において $\sum(\text{流量})=0$ 、1つの閉管路ごいに $\sum(\text{損失水頭})=0$ の条件を全管網について満たせばよい。具体的には

$$h=10.666lc^{-1.85}D^{-4.87}Q^{-1.85}(\text{m}\cdot\text{sec}) \dots\dots(1)$$

$h$ : 損失水頭,  $l$ : 管長,  $c$ : 流速係数,  $D$ : 管径,  $Q$ : 流量の演算を行なうにあたって $Q^{1.85}$ の係数を定数とみなし、電気回路において損失水頭を電圧に、流量を電流におきかえて

$$V=KI^{0.85} \dots\dots\dots(2)$$

の特性を示すようにする。McIlroyの演算機ではこの $K$ がFluistor<sup>3)</sup>の係数と呼ばれ、タングステン・フィラメントでできた非線型の抵抗で、フィラメントの明るさが大体損失水頭の大きさを示すので、目安をつける上に便利であった。しかし、実際には $K$ 値のとりうる範囲に制限があって、必ずしも普遍的には応用できず、高価なことも欠点であった。米国ボルチモア市の拡張計画に際し、管路数312、貯水池数11、負荷73の管網に対して用い十分な成果を収めた報告<sup>4)</sup>がある。

デジタル型計算機を用いる場合の問題の一つは、系内に配水池や接合井などのため圧力既知の点がいくつかある場合の取扱いがやっかいなことであるが、アナログ型では容易に解決できる。このほか、つぎのような問題に関しアナログ型は一度設置すれば大きい働きをする。すなわち、①水源の位置の変動、②粗度係数変化の影響、③管の交換、清掃、断水にともなる影響、④負荷率が変わったときの水圧変化と火災時流量の検討、⑤等水圧線の作製、⑥機能、経済性からみた管径、配水池、高架水槽の位置検討、⑦増圧ポンプの規模決定、などである。これらのうち、たとえば、⑥はデジタル型計算機の方が本質的に向いているが、上記の配水池が2池以上ある場合の問題や、①、④などはアナログ型の得意とするところで、利点といえるであろう。

なお、アナログ型計算機による管網解法について電気回路の実例などを紹介した扇田<sup>4)</sup>、Beck<sup>5)</sup>らの報告がある。

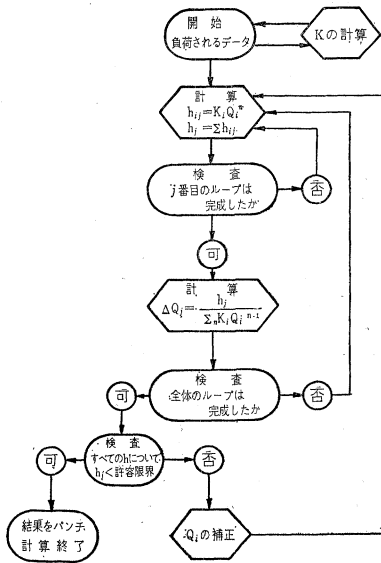
つぎにデジタル型計算機であるが、最初考えられたのは、ハーディ・クロス方式による仮定流量から出発する逐次近似計算のプログラム化で、各管網の損失水頭の総和が許容限界内に入るまでくり返し計算を行なう方法であり、それほど高くは評価されていないがすでに一般化している。中島<sup>6)</sup>はこれを改良し、修正流量値を未知数とした多元連立一次方程式に帰して解く方法を最近実施している。前者の方法では精度を上げようとするときくり返し回数が多く、時間、費用が問題になるのに対し、後者では、たとえば日本水道コンサルタント社所有の記憶容量4096語の計算機を用いて網目数40までは十分余裕があり、網目数に関係なく、くり返し回数6回で解答を得ると報じている。

初めの逐次近似計算のフロー・チャートとして、Hoag<sup>7)</sup>らによって示されたものは図-1に示すとおりで、計算にあたって $h=KQ^{1.85}$ における

$$K=10.666l/C^{1.85}D^{4.87}$$

の $C$ 、 $D$ および $l$ を各管路ごとに表示し、読取り装置によりカードにパンチする。つぎのカードの読取り中に $K$ の計算が行なわれ、記憶される。 $h$ の計算には $Q$ の対数を0.85倍して $Q$ 、 $Q^{0.85}$ を求めるが、以下図示のとおり

図-1 デジタル計算機による管網逐次近似計算のフローチャート



り、ある網目の損失水頭の計  $h_{ij}$  が求まり、その和から  $h_j$  を求め、すべての網目につき  $h$  が許容限界に収まるようにする。米国のパロ・アルト市で 38 網目、103 管路の配水管網に対し、最大許容水頭誤差を 0.3m として計算機を用いたところ、純計算時間が 50 分、同じ管路で水力条件を若干変えて行なった同種計算の平均所要時間は 17 分であったが、これは最初の仮定流量が 2 度目からは割合最終値に近くとられたためという。

連立多元 1 次方程式による中島の方法は、1 網目を 1 元とし、連立方程式作製→仮定値による計算→連立方程式作製→流量修正→方程式作製→流量修正とくり返し、最終結果をタイプするものであるが、四日市市の高区配水管網に対し、中島が前記の能力の計算機 NEAC-2101 を用いて行なった計算は約 20 分、結果タイプに 10 分であった。この場合注意を要するのは、計算機で出てきた各点の損失水頭値に対し、各点の静水頭  $H(m)$ 、地盤から上の水頭  $H_g(m)$  を求め、 $H_g$  が規定値より低いときは規準値より大となるよう管径を変更せねばならない。実際には完全な等圧化は望めないが、状況に応じ、こうした修正計算があるていどは必要である。

つぎに配水池が 2 池以上存在し、管網が相互に連絡している場合の問題であるが、連立方程式で取り扱う未知量が変わってきて、前期の方法では解決できないことになる。例えば連立多元 1 次式の方法に固執するとすれば、現実には各配水池との最近接点での水位が、既知のそれに一致するよう管径を変えてくり返し計算することになる。このくり返し計算によって、第 2 以下の配水池をのぞいた管路のみで、与えられた配水池水位と矛盾し

なくしておく必要がある。これは相当手数のかかる仕事である。四日市市の低区配水管網は網目数 28、配水池数 4 であったので、この方法により計算が行なわれ、一応満足すべき結果が得られている。しかし将来は解析的に計算の基礎式を検討し、それをプログラム化する正攻法が研究されるべきであろう。

### (2) 急速ろ過池の洗浄均等度計算など

急速ろ過池の底部集水装置による集水、および逆洗浄水圧の分布均等度については、ホイラー式、ストレーナー式あるいはポーラス スラブ式に対してはまだ理論的に解決されていないが、多孔管式の場合は水力公式集<sup>9)</sup>に示すとおり明確にされている。多孔管型集水系の任意の点では圧力は次式による。

$$y = y_0 + \frac{u_0^2 - u^2}{g} - \int_0^x \frac{n m^2 u^2}{R_0^{4/3}} dx \dots \dots \dots (3)$$

ただし、 $y$  は主管または枝管任意断面での動水頭と砂利層底部における動水頭の差、 $y_0$  は  $x=0$  (主管または枝管の始点) における  $y$ 、 $u$  は管内平均流速、 $u_0$  は  $u_{x=0}$ 、 $g$  は重力加速度、 $R$  は径深、 $n_m$  はマンニングの粗度係数、 $x$  は  $x=0$  から管軸に沿って測った距離である。ここで  $dx$  を小さくとり、数値積分を計算機に行なわせると、座標各点の洗浄水圧分布を早く求めることができる。この場合のプログラミングは簡単であるが、同様にして、たとえば閉塞をともなる層化された砂層の損失水頭の計算<sup>9)</sup>も、実測空けき率と砂粒の形状係数、透水係数の間の関係式が確立しているかぎり容易であり、能率化される。

### (3) 降雨曲線による下水管の流出追跡

下水道計画における市街地雨水流出量の計算は、従来の合理式計算による最大雨水流出率計算だけでなく、流出波形、流出系全体の貯留能力などを知って、設計規模に対する安全性、経済性のバランス評価へと進もうとしている。このためアメリカで開発されつつあるのが、地表面や側溝、下水きょの貯留能、浸透能を考慮し、固有の貯留関数をばい介として追跡計算を行なうという方式であるが、その代表的なものがトーリンらによるシカゴ方式<sup>10)</sup>である。これは、比較的規則正しい街区で、降雨のハイレトグラフ (ハイドログラフのもとになる降雨-時間曲線) を入力とし、芝生や路面、側溝などの貯留能力や浸透能力を流量、時間の関数として貯留関数を定めておき、時間間隔を小刻みにとって、流入率-貯留率 = 流出率 = つぎの流入率の関係を、地面→側溝→雨水ます→枝管→主管の順に追跡してゆくやり方である。たとえば地面流出の追跡式は

$$\left. \begin{aligned} \sigma - q &= 60 \, dD/dt_0 \\ D &= 0.342 \left( \frac{0.0007 \, i + c}{S_0^{1/3}} \right) I^{1/3} q^{1/3} \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (4)$$

(ft-sec)

で示され、 $\sigma$  が小ロットへの流入率、 $q$  が流出率でつぎのロットの流入率になる。 $D$  は貯留関数で  $t_0$  は経過時間、 $S_0$  は地表勾配、 $l$  は流路長、 $c$  は定数である。逐次計算の時間間隔  $\Delta t_0$  は最小 0.5 分位にとられるが、この種の計算は従来の合理公式のように単純ではなくばう大なので、計算機の助けを必要とする。方法としてははるかに合理的であり、わが国では流域の比較的大きい、たとえば広域下水道の排水計画などに将来応用されうると考えられる。

#### (4) 水道、下水道料金の計算

事務上の問題であるが、公営企業体には多数の種類の新な消費者がふくまれ、複雑な料金体系により事務処理が面倒なので早くから電子装置が応用されている。料金計算そのものは複雑ではないが、東京などの大企業体では消費単位数がばう大なので、帳簿整理、事務能率化のため計算機が必要である。この場合計算機が行なう作業は、基本作業 7 と補助作業 3 位の割合といわれ、①帳簿への記録、②記録の正確さの照査、③帳票の仕別整理、④計算および集計、⑤報告者などの作製、がふくまれるようである。東京都水道、下水道について、この目的での計算機利用を布川<sup>11)</sup>がくわしく解説しているので参照されたい。

### 3. 結 び

以上衛生工学、とくに上下水道関係における電子計算機の利用状況、将来の利用可能性について概説したが、与えられた紙数も少なく、筆者の専門的知識の不足のため、うわすべりで突込み不足に終わった点は何とぞご諒承を願う次第である。

#### 参 考 文 献

- 1) Perry, H.A., Jr., Vierling, D.F. & Kohler, R.W. : "Network-Flow Analysis, Speeded by Modified Ele-

- ctrical Analog", Eng. News Rec., Sept. 22, 19~23 (1949).  
 2) McIlroy, M.S. : "Direct-Reading Electric Analyzer for Pipeline Networks", Jour. AWWA, 42, pp. 347~366 (1950)  
 3) Werner, B.L. : "McIlroy Network Analyzer Solves Baltimore Distribution Problems", Water Works Engineering, Apr. pp. 343~385 (discontinued)(1956)  
 4) 扇田彦一 : "管網流量の電気的解法について", 水道協会雑誌 208, pp. 26~34(1956).  
 5) Beck, von Karl, Trier, und Friederichs, Karl-Heinz : "Erfahrungen mit dem elektrischen Analogierechner für die Wasserrohrnetz-Berechnung", GWF, 99 Jahrg. pp. 1071~1130 (1958).  
 6) 中島重旗 : "電子計算機による管網計算", 工業用水, 1964. 7 受理 (未発表原稿).  
 7) Hoag, L.N. & Weinberg, G. : "Pipeline Network Analysis by Electronic Digital Computer", Jour. AWWA, 49, pp. 517~524 (1957).  
 8) 土木学会 : 水理公式集, pp. 380~381 (1963).  
 9) 土木学会 : 水理公式集, pp. 374~378 (1963).  
 10) Tholin, A.L. & Keifer, C.J. : "The Hydrology of Urban Runoff", Proc. ASCE, SA 2, pp. 47~106 (1959).  
 11) 布川敏雄 : "料金事務への電子計算機利用の实例(I), (II)", 水道協会雑誌, 338, pp. 12~21; 339, pp.14~24 (1962).

#### その他の参考文献

- 12) Jacoby, H. : "Application of Electronics to the Water Supply Industry", Jour. AWWA, 49, pp. 1043~1049 (1957).  
 13) Friederichs, Karl-Heinz : "Analogie-Rechenanlage für Verbundnetze", GWF, 98 Jahrg, pp. 1119~1121 (1957).  
 14) 島田健一 : "工業用水道浄水場のプロセス制御化", 用水と廃水, 5, pp. 713~720 (1963).  
 15) Gooch, R.S. : "Electronic Computers in the Water Supply Field", Jour. AWWA, 52, pp. 311~314 (1960).  
 16) 藤田博愛 : "上水道における計装技術の導入と計装化の現状", 用水と廃水, 5, pp. 695~704 (1963).

## 国家公務員採用中級試験について

昭和 39 年度国家公務員採用中級試験はつぎのように行なわれますのでお知らせします。なお、詳細は人事院各地方事務所にお問合わせください。

受付期間 : 10月10日~10月30日

第1次試験 : [教養試験・専門試験]  
11月29日

第2次試験 : [口述試験・身体検査]  
40年1月中旬~下旬

合格発表 : 40年2月中旬

地 方	申 込 先	所 在 地
北 海 道	人事院札幌地方事務所	札幌市大通り西 10 丁目
東 北	仙 台	仙台市外肥丁通 21
関東・甲信越	東 京	東京都千代田区霞ヶ関 1 の 2
東海・北陸	名 古 屋	名古屋市中区南外堀町 6 の 1
近 畿	大 阪	大阪市東区法円坂町
中 国	広 島	広島市基町 1
四 国	高 松	高松市天神町 1 丁目 9 の 1
九 州	福 岡	福岡市舞鶴 9 丁目 5 の 20