

## 配水管網の双対的類似電気回路網によるシミュレーション

SIMULATION OF PIPE NETWORKS BY ELECTRICAL  
DUALOG NETWORKS

大野 俊夫\*・渡辺 興作\*\*

By Toshio OHONO and Yosaku WATANABE

## 1. ま え が き

水道施設における配水管網、ガス管網などの流量推定方法については多くの研究がなされている。その方法は、Hardy-Cross法に代表されるデジタル・シミュレーション<sup>1),2)</sup>と電気的モデルを使用するアナログ・シミュレーション<sup>3),4)</sup>とに分類できる。前者は電算機の普及につれ広く応用されているが、後者も日常業務の小規模な管網解析を行う場合には時間的、経済的に有利であり、管路の一部、たとえば流量などを変更するときの解析は非常に容易にできるなど多くの利点があるので実用化されている。後者の動作原理は、配水管網における管路と類似の特性をもつ非線形抵抗器で構成した電気回路網がもとの配水管網と類似関係になっている点にある。すなわち、管路の損失水頭に電圧を、流量には電流を対応させた類似の電気回路網によってシミュレートし、配水管網の損失水頭および流量を推定するものである。

他方、双対性の原理によって、電気回路網に双対な新しい電気回路網を考えることができる。この新しいアナログ・シミュレーションの実現の条件は、管路の損失水頭を電流に、流量を電圧に対応させる新しい電気回路素子の存在にある。近年の半導体の発達に伴い、ある種の半導体の電圧非線形抵抗器は、いままで使用されてきた電気回路素子と電圧-電流双対の特性をもっているため、この新しいアナログ・モデルを構成・実現できることが指摘されている<sup>5)</sup>。

本論文は半導体の電圧非線形抵抗器であるバリスタを使用した配水管網の双対的類似電気回路網による新しいアナログ・モデルの構成方法およびそのシミュレーションの結果について検討したものである。この種類の基礎的研究は次のような面からも必要であろう。すなわち、

アナログ・シミュレーションの整理・拡張、およびアナログ・モデルに使用する回路素子の選択の拡張などが考えられる。

## 2. 配水管網のアナログ・シミュレーション

## (1) 配水管網に類似の電気回路網によるシミュレーション・モデル-E

配水管網の位相幾何学的構造は、管網を構成する管路およびその結合点をそれぞれ枝路および節点としたグラフで表現できる。このグラフに帰着できるシステムは配水管網以外でも、たとえばガス管網、電気回路網などいくらかも存在する。中でも電気回路網はそのグラフの枝路の特性と類似の回路素子を得やすく、簡便にそのグラフを実体化できるので管網などの他の物理系のアナログ・シミュレーション用モデルとしてしばしば使われる。

二つのまったく異なった物理系、たとえば配水管網と電気回路網でも、そのグラフが同じで、かつグラフの枝路の横断量と流量量との関係式が同じなら、二つの物理系は類似の関係にあるので、一方の物理系を他方の物理系でシミュレートできる<sup>6)</sup>。すなわち、 $k$ 本の管路より構成されている配水管網の  $j$  番目の管路内の流量量である流量  $Q_j$  と横断量である損失水頭  $H_j$  とは

$$H_j = K_{Pj} \cdot Q_j^m \quad (j=1, 2, \dots, k) \dots\dots\dots (1)$$

の関係式で表わされるのに対し、類似の電気回路網の対応した  $j$  番目の枝路の抵抗器の流量量である電流  $I_j$  と横断量の電圧  $V_j$  の関係式が

$$V_j = K_{Ej} \cdot I_j^m \quad (j=1, 2, \dots, k) \dots\dots\dots (2)$$

となる非線形抵抗器を用いれば、配水管網を類似の電気回路網でシミュレートできる<sup>7),8)</sup>。ここに  $K_{Pj}$  は  $j$  番目の管路の流水抵抗、 $K_{Ej}$  は非線形抵抗器の電圧係数、 $m$  は管路によって決まる定数で、Darcy-Weisbachにしたがうと  $m=2$  となる。

\* 正会員 豊田工業高等専門学校 助教授 土木工学科

\*\* 豊田工業高等専門学校 助教授 物理・応用物理

このシミュレーションでは、二つの物理系の間の物理量の写像関係、すなわち、配水管網  $P$  の  $j$  番目の管路の水量  $H_j, Q_j$  と  $P$  に類似の電気回路網  $E$  の対応した非線形抵抗器の電気量  $V_j, I_j$  との変換は

$$\begin{pmatrix} V_j \\ I_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \rho_v & 0 \\ 0 & \rho_I \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_j \\ Q_j \end{pmatrix} \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad \dots\dots\dots(3)$$

のように行えばよい。ここに、管網  $P$  と電気回路網  $E$  の物理量を関係づける  $\rho_v$  は水頭換算係数、 $\rho_I$  は流量換算係数という。 $\rho_v, \rho_I$  はそれぞれ自由に決めることができないが、次のような関係がある。すなわち、式(2)を式(1)で両辺をわり、 $\rho = K_{Ej}/K_{Pj} (j=1, 2, \dots, k)$  のように  $\rho$  を全管路に共通に選ぶと、 $\rho_v, \rho_I, \rho$  は

$$\rho_v = \rho \cdot \rho_I^m \quad \dots\dots\dots(4)$$

のような関係が成立するとき管網  $P$  と電気回路網  $E$  とのグラフの枝路特性は類似であるといえる。式(4)の関係を満たす  $\rho_v, \rho_I$  よりなる式(3)の変換は、二つの違ったカテゴリーの物理系、すなわち水理系と電気系との写像を決定することになる。

(2) 配水管網の双対的類似電気回路網によるシミュレーション・モデル- $\bar{E}$

平面グラフには、かならず双対なグラフが存在する<sup>7)</sup>。したがって、平面電気回路網  $E$  に対し、それに双対な電気回路網  $\bar{E}$  が存在し、 $E$  から  $\bar{E}$  へ、または  $\bar{E}$  から  $E$  への変換操作(双対変換)が存在する。同様にして、配水管網  $P$  に双対な管網  $\bar{P}$  も考えることができる。これらの4種類の物理系の関係を図-1に整理した。図-1より配水管網  $P$  の電気的モデルとしては、 $P$  に類似の電気回路網  $E$  および  $E$  に双対、すなわち  $P$  に双対的類似の電気回路網  $\bar{E}$  の二種類の構成方法がある。2.(1)にのべたシミュレーション・モデル- $E$  は図-1の類似の関係  $E \leftrightarrow P$  を使って配水管網  $P$  をシミュレートするものである。

配水管網  $P$  の双対的類似電気回路網  $\bar{E}$  による  $P$  の

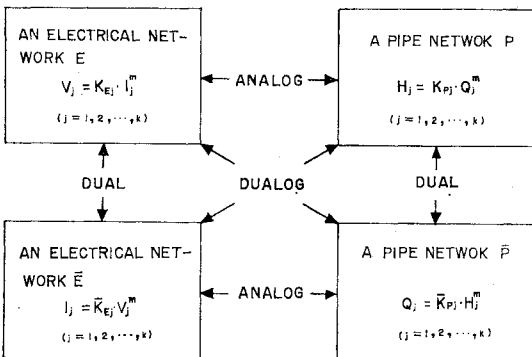


図-1 類似, 双対, 双対類似の関係

シミュレーションが以下にのべるように可能である。すなわち、配水管網  $P$  より類似電気回路網  $E$  への対応  $P \rightarrow E$  によっては両者のグラフは位相的に同値であり、さらに  $E \rightarrow \bar{E}$  の双対変換でもグラフは位相的に同値である<sup>7)</sup>。双対グラフの双対変換はもとのグラフに等しく、 $\bar{\bar{E}} \rightarrow E$  となる。したがって、 $P$  のグラフと  $\bar{E}$  のグラフは位相的に同値となるので  $\bar{E}$  の枝路特性が式(1)と双対類似の

$$I_j = \bar{K}_{Ej} \cdot V_j^m \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad \dots\dots\dots(5)$$

のような電圧-電流特性の電圧非線形電気回路素子であれば  $\bar{E}$  で  $P$  のシミュレーションができる。ある種の半導体抵抗器のバリスタは式(5)の電圧-電流特性を示す。ここに、 $\bar{K}_{Ej}$  は  $j$  番目のバリスタの電流係数で、バリスタによって一定である。式(5)と式(2)とを比較すると、バリスタの流量量である電流と横断量の電圧の関係が入れかわっているのは、双対変換によって回路網の枝路の流量量は横断量に、横断量は流量量に変換されることに対応している。よって配水管網  $P$  の双対的類似電気回路網  $\bar{E}$  の枝路としてバリスタを用いれば  $\bar{E}$  を実体化でき、さらに配水管網  $P$  をシミュレートできる。管網  $P$  の  $j$  番目の管路の水量  $H_j, Q_j$  と  $\bar{E}$  の対応した枝路の電気量  $I_j, V_j$  の間の変換関係は

$$\begin{pmatrix} I_j \\ V_j \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \bar{\rho}_I & 0 \\ 0 & \bar{\rho}_v \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_j \\ Q_j \end{pmatrix} \quad (j=1, 2, \dots, k) \quad \dots\dots\dots(6)$$

のようにすればよい。ここに  $\bar{\rho}_I$  は水頭換算係数、 $\bar{\rho}_v$  は流量換算係数で、式(5)を式(1)で両辺をわり、 $\bar{\rho} = \bar{K}_{Ej}/K_{Pj} (j=1, 2, \dots, k)$  とおくと、 $\bar{\rho}_I, \bar{\rho}_v$  と  $\bar{\rho}$  の間には

$$\bar{\rho}_I = \bar{\rho} \cdot \bar{\rho}_v^m \quad \dots\dots\dots(7)$$

の関係が必要となる。

このシミュレーションは図-1の双対類似の関係  $P \leftrightarrow \bar{E}$  によるものであるが、 $P \rightarrow \bar{E}$  の双対類似変換は配水管網  $P$  に類似の電気回路網  $E$  を双対変換して  $\bar{E}$  をうる手順とまったく同様であるので、双対変換の方法を次に示す。平面に描かれた回路網  $E$  は、平面を  $M$  個の網目  $m_1, m_2, \dots, m_M$  に分割されているとする(図-2(a))。各網目は一番外側を除けば単連結であり、各

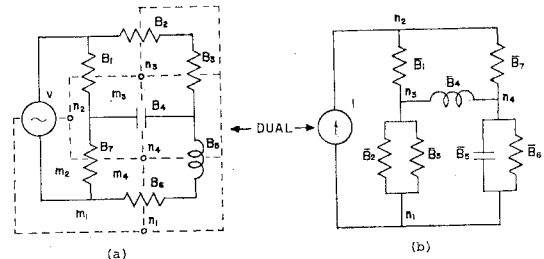


図-2 (a) 電気回路網と (b) その双対的電気回路網

枝路はいずれもどれか二つの網目  $m_i$  と  $m_j$  の境界となっている。また枝路の両端は二つの節点  $n_i, n_i'$  になっているものとする。

(a) おおのこの網目  $m_i (i=1, 2, \dots, M)$  の中に、それぞれ一つずつの点  $n_i (i=1, 2, \dots, M)$  をおく。

(b) 二つの網目  $m_i$  と  $m_j$  とが一つの枝路  $B_l$  によって境を接しているなら、 $n_i$  と  $n_j$  とを一つの枝路  $\bar{B}_l$  で  $B_l$  を横切って結ぶ。 $n_i$  と  $m_j$  が二つ以上の枝路を境にして接していれば、それぞれの枝路について、別々に  $\bar{B}_l$  をつくる。

(c) 枝路  $B_l$  がキャパシタンス  $C$  のときは、 $\bar{B}_l$  は  $C$  に双対のインダクタンス  $L$  に、 $B_l$  がインダクタンス  $L$  のときは  $\bar{B}_l$  はキャパシタンス  $C$  に、 $B_l$  が抵抗のときは  $\bar{B}_l$  はこれと双対の抵抗にする。

(d) 枝路  $B_l$  が電圧源であれば、枝路  $\bar{B}_l$  は同じ値をもつ電流源、 $B_l$  が電流源なら  $\bar{B}_l$  は電圧源とする。

このようにして作製したすべての新しい節点  $n_i (i=1, 2, \dots, M)$  とこれら節点を結ぶ新しい枝路  $\bar{B}_l (l=1, 2, \dots, M)$  からなる新しい回路網  $\bar{E}$  はもとの回路網  $E$  の双対回路網になっている。図-2(a)の電気回路網を双対変換した結果は図-2(b)となる。この例よりわかるように、双対変換によって、たとえば図-2(a)で枝路  $B_5$  と  $B_6$  は流通量の電流が共通で直列になっているのが、図-2(b)では  $\bar{B}_5$  と  $\bar{B}_6$  で横断量の電圧が共通の並列に接続され、図-2(a)で  $B_2$  と  $B_3$  に共通であった電流は図-2(b)では  $\bar{B}_2$  と  $\bar{B}_3$  に共通の電圧に変換され、図-2(a)の網目  $m_3$  のループの枝路  $B_1, B_2, B_3, B_4$  の電圧の和は、図-2(b)では  $n_3$  に接続している枝路  $\bar{B}_1, \bar{B}_2, \bar{B}_3, \bar{B}_4$  の電流の和になっており、電圧と電流の役目が変換していることが知られる。

このようにして行う双対交換は、電気回路網の枝路の特性が線形、非線形であるかを問わず考えることができ、たがいに双対な回路網の中の物理的状態の対応は、それぞれ

枝路  $B_l$  の電流 (流通量)  $\leftrightarrow$  枝路  $\bar{B}_l$  の電圧 (横断量)  
 枝路  $B_l$  の電圧 (横断量)  $\leftrightarrow$  枝路  $\bar{B}_l$  の電流 (流通量)

Kirchhoff の第1法則  $\leftrightarrow$  Kirchhoff の第2法則

節 点  $\leftrightarrow$  網 目  
 網 目  $\leftrightarrow$  節 点  
 電 圧 源  $\leftrightarrow$  電 流 源  
 短 絡  $\leftrightarrow$  開 放  
 直 列 接 続  $\leftrightarrow$  並 列 接 続  
 .....  $\leftrightarrow$  .....

などのように対応している。このことは式(2)の特性をもつ電流非線形抵抗器と式(5)の特性をもつ電圧非線形抵抗器の中の物理的状態が双対関係にあるので、電圧と電流を入れかえれば、式(5)と式(2)は同じである。し

たがって双対的類似電気回路網  $\bar{E}$  の枝路に式(5)の特性のバリスタを使った  $\bar{E}$  は配水管網  $P$  のシミュレーション・モデルとして使用できる。

### 3. 配水管網の双対的類似電気回路網シミュレーション・モデル- $\bar{E}$

#### (1) 回路素子としてのバリスタ

シミュレーションに使用する式(5)の電圧-電流特性をもつ半導体抵抗器バリスタは半導体の障壁の特性を利用した電圧に敏感な電圧非線形抵抗器である。図-3にその特性の測定例を示す。シミュレートすべき配水管網  $P$  の管路特性式(1)の  $m$  の値を  $m=2$  としたので、これに対応して式(5)のバリスタの電圧非直線係数  $m$  も  $m=2$  で、かついろいろの値  $\bar{K}_E$  をもったバリスタを用意する。このバリスタが配水管網  $P$  の管路をシミュレートするのでバリスタの電圧2乗特性は広い範囲で成り立つものが望ましい。今回は市販の円板型バリスタの中から2乗特性を示す各種の  $\bar{K}_E$  をもったバリスタを選定した。

#### (2) バリスタの温度による影響

室温  $20^\circ\text{C}$  から  $70^\circ\text{C}$  の範囲で、使用したバリスタ [松下電器産業(株)製 ERV-02 E 2100 M] の抵抗値の温度係数は  $-0.1(\%/^\circ\text{C})$  以内、電圧非直線係数  $m$  の温度係数は  $\pm 0.1(\%/^\circ\text{C})$  であるので、実験中に  $\pm 5^\circ\text{C}$  程度の温度変化が生じた場合には、バリスタの抵抗値で  $-0.5\%$ 、 $m$  の値は  $\pm 0.5\%$  程度変化するが実験には大きい誤差を与えない。この温度による影響は、日

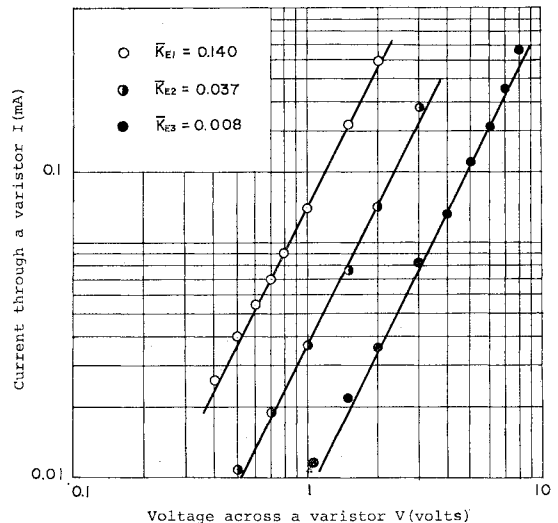


図-3 バリスタの電圧-電流特性

本電気(株)製 1S 1210, (株)日立製作所製 HV 23 についても同程度である。

(3) シミュレーションの手順

シミュレートすべき配水管網  $P$  は,  $k$  本の管路より構成され, ある接合点に  $q_0$  の流入があり, 各接合点から一定流量  $q_i (i=1, 2, \dots, N_0)$  が流出している配水管網  $P$  の場合を考え, 各管路の流量  $Q_i (i=1, 2, \dots, k)$  および損失水頭  $V_i (i=1, 2, \dots, k)$  を推定する手順を以下に示す:

(a) 管路の流水抵抗  $K_P$  を管内径  $d(m)$ , 管路延長  $l(m)$ , 粗度係数  $n$  より

$$K_P = 10.29 \cdot n^2 \cdot l / d^{19/3} \dots\dots\dots (8)$$

にしたがって算出する。ただし  $n=0.012$  とした。

(b) 選定したバリスタで  $P$  をシミュレートできるように  $\bar{\rho}$  の値を決める。この  $\bar{\rho}$  によって流水抵抗  $K_P$  の管路に  $\bar{K}_E = \bar{\rho} \cdot K_P$  のバリスタを対応させる。

(c) 2.(a)~(d) の順序にしたがい, さらに上述の (b) の関係で管路に対応したバリスタによって配水管網  $P$  に双対的類似電気回路網  $\bar{E}$  を構成する。ある点への流入量  $q_0$  には  $v_0 = \bar{\rho} \cdot q_0$  の電圧源を用意し, 流出量  $q_i$  には  $v_i = \bar{\rho} \cdot q_i$  の電圧降下が対応するので, そのように調整できる可変抵抗器  $r_i (i=1, 2, \dots, N_0)$  を用意する。

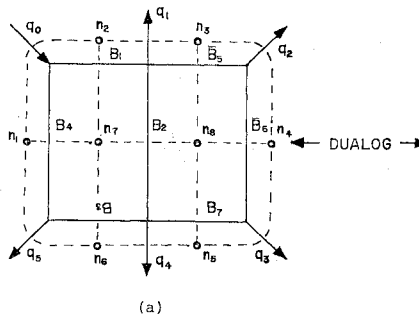
(d) 以上より回路網  $\bar{E}$  において, 流入・流出量に対応したように電圧源, 抵抗  $r_i$  を調整したのち, 各管路に対応しているバリスタの電圧  $V_j$ , 電流  $I_j (j=1, 2, \dots, k)$  を順次バルボル, 電流計で測定する。

(e) えられた  $V_j, I_j$  より, 式 (6) によって配水管網  $P$  の各管路の  $Q_j, H_j (j=1, 2, \dots, k)$  を算出する。

比較のために, デジタル・シミュレーションの代表的な Hardy-Cross 法にしたがって, 配水管網  $P$  の各枝路の  $Q_j, H_j (j=1, 2, \dots, k)$  の算出を行って比較の資料とした。

(4) シミュレーションの結果

実際の配水管網  $P$  は複雑であるが, その基礎的形状



図—5 (a) 日の字型配水管網と (b) その双対的類似電気回路網

は口の字型, 日の字型, 田の字型などで成立しているのので, この3種類の配水管網の基本型を重点的に双対的類似電気回路網  $\bar{E}$  によってシミュレートさせ, その結果を詳細にのべる。

a) 口の字型配水管網のシミュレーション

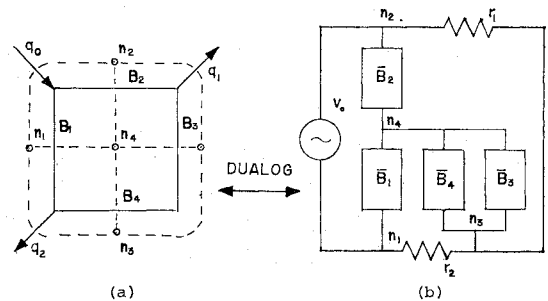
図—4 (a) に口の字型管網図およびその双対的類似電気回路網を 図—4 (b) に示す。表—1 に管路  $B_j (j=1, 2, \dots, 4)$  および流入・流出量が最下欄の場合のシミュレーション実験を 図—4 (b) によって行った結果および Hardy-Cross 法による推算値を示す。なお, Hardy-Cross 法の仮定流量に対する最終の補正流量は  $1.0 \times 10^{-4} (m^3/s)$  としたので Hardy-Cross 法の打切誤差は  $1.0 \times 10^{-4}$  程度である。

b) 日の字型配水管網のシミュレーション

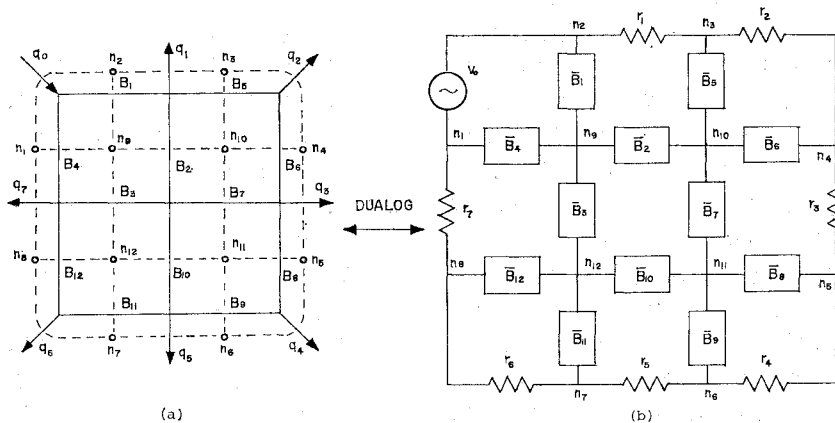
図—5 (a) に日の字型配水管網図, 図—5 (b) にその双対的類似電気回路網を示す。ここに  $\bar{B}_j (j=1, 2, \dots, 7)$  は式 (5) の特性をもつバリスタで各管路に対応し,  $r_j (j=1, 2, \dots, 6)$  は各接合点の流出量を調整するための可変抵抗器,  $v_0$  は流入量をシミュレートする電圧源である。表—2 には, そのシミュレートした結果および Hardy-Cross 法による計算結果を記した。

c) 田の字型配水管網のシミュレーション

図—6 (a) に, 田の字型配水管網図を, (b) にはその双対的類似電気回路網を示す。表—3 にはこのシミュレーションの結果と Hardy-Cross 法の結果をまとめた。



図—4 (a) 口の字型配水管網と (b) その双対的類似電気回路網



図—6 (a) 田の字型配水管網と (b) その双対的類似電気回路網

表—1 口の字型配水管網と双対的類似電気回路網によるシミュレーションの結果

Pipe network $P$				Dualog simulation $\bar{E}$					Hardy Cross	
$B_j$	$l_j$ (m)	$d_j$ (m)	$K_{PJ}$	$\bar{K}_{Ej}$	$V_j$ (volts)	$I_j$ (mA)	$Q_j$ (m <sup>3</sup> /s)	$H_j$ (m)	$Q_j$ (m <sup>3</sup> /s)	$H_j$ (m)
$B_1$	220	0.30	200	0.040	1.90	0.120	0.211	7.4	0.211	8.9
$B_2$	410	0.30	375	0.075	1.65	0.190	0.183	12.0	0.189	13.5
$B_3$	215	0.30	195	0.039	1.00	0.040	0.111	2.5	0.111	2.4
$B_4$	200	0.30	185	0.037	1.00	0.040	0.111	2.5	0.111	2.3

$q_0=0.4, q_1=0.1, q_2=0.3$ (m<sup>3</sup>/s),  $\bar{p}=1/5\,000, \bar{\rho}_p=9.0$ (volts·s/m<sup>2</sup>),  $\bar{\rho}_I=0.016$ (mA/m)

表—2 日の字型配水管網と双対的類似電気回路網によるシミュレーションの結果

Pipe network $P$				Dualog simulation $\bar{E}$					Hardy Cross	
$B_j$	$l_j$ (m)	$d_j$ (m)	$K_{PJ}$	$\bar{K}_{Ej}$	$V_j$ (volts)	$I_j$ (mA)	$Q_j$ (m <sup>3</sup> /s)	$H_j$ (m)	$Q_j$ (m <sup>3</sup> /s)	$H_j$ (m)
$B_1$	1120	0.40	220	0.044	3.60	0.661	0.099	2.45	0.104	2.37
$B_2$	1345	0.40	265	0.053	1.86	0.189	0.052	0.70	0.051	0.70
$B_3$	2240	0.40	440	0.088	2.20	0.398	0.061	1.47	0.056	1.40
$B_4$	915	0.40	180	0.036	3.40	0.458	0.094	1.70	0.096	1.67
$B_5$	1500	0.35	600	0.120	1.03	0.117	0.029	0.43	0.029	0.48
$B_6$	1720	0.35	690	0.138	0.56	0.045	0.016	0.17	0.015	0.16
$B_7$	1745	0.35	700	0.140	0.35	0.025	0.010	0.09	0.010	0.08

$q_0=0.20$ (m<sup>3</sup>/s),  $q_1=0.024, q_2=0.013, q_3=0.005, q_4=0.118, q_5=0.04, \bar{p}=1/5\,000, \bar{\rho}_p=36.7$ (volts·s/m<sup>2</sup>),  $\bar{\rho}_I=0.270$ (mA/m)

表—3 田の字型配水管網と双対的類似電気回路網によるシミュレーションの結果

Pipe network $P$				Dualog simulation $\bar{E}$					Hardy Cross	
$B_j$	$l_j$ (m)	$d_j$ (m)	$K_{PJ}$	$\bar{K}_{Ej}$	$V_j$ (volts)	$I_j$ (mA)	$Q_j$ (m <sup>3</sup> /s)	$H_j$ (m)	$Q_j$ (m <sup>3</sup> /s)	$H_j$ (m)
$B_1$	834	0.50	50	0.010	10.25	1.09	0.201	2.09	0.201	2.01
$B_2$	2005	0.40	395	0.079	3.29	0.90	0.064	1.71	0.063	1.80
$B_3$	2259	0.40	445	0.089	3.09	0.91	0.060	1.74	0.062	1.69
$B_4$	834	0.50	50	0.010	10.10	1.06	0.196	2.03	0.199	1.98
$B_5$	1509	0.35	650	0.121	3.71	1.70	0.073	3.26	0.071	3.03
$B_6$	1091	0.40	215	0.043	0.94	0.04	0.018	0.07	0.015	0.05
$B_7$	1472	0.40	290	0.058	3.10	0.77	0.061	1.47	0.066	1.25
$B_8$	3367	0.35	1350	0.270	1.21	0.37	0.024	0.71	0.024	0.80
$B_9$	2993	0.35	1200	0.240	1.39	0.40	0.027	0.77	0.027	0.89
$B_{10}$	1574	0.40	310	0.062	3.26	0.74	0.064	1.42	0.064	1.24
$B_{11}$	1371	0.40	270	0.054	0.95	0.05	0.019	0.09	0.020	0.11
$B_{12}$	2589	0.40	510	0.102	3.79	1.69	0.074	3.24	0.076	2.96

$q_0=0.4$ (m<sup>3</sup>/s),  $q_1=0.062, q_2=0.056, q_3=0.056, q_4=0.052, q_5=0.056, q_6=0.057, q_7=0.061, \bar{p}=1/5\,000, \bar{\rho}_p=51.1$ (volts·s/m<sup>2</sup>),  $\bar{\rho}_I=0.522$ (mA/m)

これら 3 種類の基本的配水管網についての双対的類似電気回路網によるシミュレーションの結果と Hardy-Cross 法の差は表一1~3 より 3% 程度であり、この差は使用したバリスタの電圧-電流特性が式 (5) よりずれること、測定器具の精度が 2.5 級 (許容誤差  $\pm 2.5\%$ ) であることなどを考慮すると、実験誤差範囲内であるといえる。本法による結果と Hardy-Cross 法による計算値誤差について詳細に示すと、次のようである。

日の字型の場合について表一2 より、後者を基準として誤差を計算すると、誤差の絶対値の単純平均は流量において 3.8%、損失水頭について 3.6% になる。口の字、日の字、田の字の各型の誤差は、流量については、口の字の場合を 1 とすると 1:3.8:2.5、損失水頭については、1:0.3:0.7 となり、かならずしも累積しない。

これらの結果は双対的類似電気回路網による配水管網のシミュレーション・モデル- $\bar{E}$  の妥当性を示すものである。

#### 4. あとがき

配水管網のアナログ・シミュレーションには、二つの双対的關係にある方法があることについてのべた。その一つは従来より実用化されている直接類似法であり、他の一つは今回、検討した双対的類似電気回路網による方法である。本論文では後者の方法を使用し基本的な管網についてその実用性を考察した。この両者は表裏の關係にあるシミュレート方法でありこれら二方法以外のアナログ・シミュレーションは存在しない。それは管路の流量である流量と横断量としての損失水頭の二つの水理量をアナログ・シミュレーション・モデルの枝路の流量

と横断量への対応の仕方には、(a) 流量  $\rightarrow$  流量 (横断量  $\rightarrow$  横断量)、(b) 流量  $\rightarrow$  横断量 (横断量  $\rightarrow$  流量) の二つ以外にはないからで、(a) が従来の方法であり、(b) が今回検討したものである。

方法 (a)、(b) のそれぞれに特徴はあるが、両方の方法を同時に検討することによって、次のようなことが判明した。アナログ・シミュレーションの方法論の拡張によってもたらされるものは、一方の方法で考えられたり、考え易いことを他の方法へ容易に変換し応用できること、電子工学の発達に伴いシミュレートに使用する回路素子を広くもとめることができること、などである。

終りに、本研究の取りまとめに関してご指導と助言をいただいた岐阜大学工学部 河村三郎教授、ならびに実験に協力していただいた内田貢朗君に感謝の意を表します。なお本論文の計算には名古屋大学大型計算機センターを使用したことを付記します。

#### 参 考 文 献

- 1) 青木康夫：クロスの管網計算法の改良について、水道協会雑誌，279号(12)，pp. 8~10, 1957.
- 2) 合田 健・雄倉幸昭：1次化連立式による新管網解法とその応用，土木学会論文集，138号(2)，pp. 21~29, 1967.
- 3) 扇田彦一：管網流量の電氣的解法について，水道協会雑誌，208号，pp. 26~34, 1951.
- 4) 長畑荒次郎：電気計算盤による配水管網の計算について，水道協会雑誌，322号，pp. 29~40, 1961.
- 5) 大野俊夫・渡辺興作：電気回路相似法による管網計算について，土木学会第27回年次学術講演会概要集，II-260, 1972.
- 6) Karplus, W.J. and W.W. Soraka: Analog Methods, 2nd Ed., McGraw-Hill Co., 1959.
- 7) Seshu, S. and M.B. Reed: Linear Graphs and Electrical Networks, pp. 41~51, Addison-Wesley Co., 1961.

(1975.8.8・受付)