

香川大学工学部 正会員 ○井面 仁志  
 香川大学工学部 正会員 白木 渡  
 香川大学工学部 非会員 今井 慈郎  
 (株) STNet 非会員 澁谷 朱美

## 1. はじめに

地下に埋設されている構造物や連続運転が必要なシステムに設置されているセンサは、直接点検するのが困難であるため、センサ値のみで故障部位を検出し、故障の波及を防止することが求められる。

本研究では、免疫型システムの概念を取り入れた自律分散診断アルゴリズムを応用して、センサ値のみで故障部位の検出ならびに故障の波及を防止することができる故障診断システムを構築する。そして、送配水システムを想定した管網系モデルを対象にセンサ及びプロセス故障診断解析を行う。

## 2. 自律分散診断アルゴリズム

自律分散診断は、単純な処理機能を備えたユニット同士が互いに評価しあい、1ヶ所での集中処理を行わない診断手法である。ユニット（センサ） $i$  から  $j$  を診断する際、正常か異常かを判定するセンサ、プロセスの信用度導出式を以下に示す<sup>1)</sup>。

$$\frac{dr_i(t)}{dt} = \sum_{k, i \in S_k} \{T_k^+ R_{T_k}(t) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{j=n_k} R_j(t)\} - r_i(t) \quad (1)$$

$$\frac{dr_{T_k}(t)}{dt} = \frac{1}{2} (T_k^+ - 1) \prod_{i, i \in S_k} R_i(t) - r_{T_k}(t) \quad (2)$$

ここで、 $R_i(t) = 1/(1 + \exp(-r_i(t)))$

$$R_{T_k}(t) = 2/(1 + \exp(-r_{T_k}(t)))$$

また $\lambda_k$ は、制約条件における閾値内の場合 $T_k=1$ (正常)、閾値外の場合 $T_k=-1$ (異常)とし、 $T_k^+ = n_k(T_k - 1) + \lambda_k$ で求められる。なお $n_k$ はそれぞれの制約条件内のセンサの数、 $\lambda_k$ は $0 \leq \lambda_k \leq n_k$ の任意の値である。

## 3. 免疫型故障診断システムによる管網系の故障診断

送配水システムを想定した管網系モデル(図1)を対象として免疫型故障診断システムによるセンサ及びプロセスの故障診断を行う。

図1の各節点に式(3)に示す流量連続条件を設定し、制約条件とする。

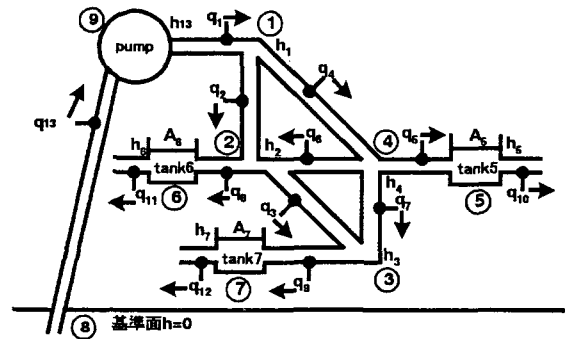


図1 管網系モデル

$$\left. \begin{aligned} T_1: -q_1 + q_2 + q_4 &= 0 & T_5: A_5 \dot{h}_5 - q_5 + q_{10} &= 0 \\ T_2: -q_2 + q_3 - q_6 + q_8 &= 0 & T_6: A_6 \dot{h}_6 - q_8 + q_{11} &= 0 \\ T_3: -q_3 - q_7 + q_9 &= 0 & T_7: A_7 \dot{h}_7 - q_9 + q_{12} &= 0 \\ T_4: -q_4 + q_5 + q_6 + q_7 &= 0 & T_9: -q_{13} + q_1 &= 0 \\ T_8: q_{13} - A_5 \dot{h}_5 - A_6 \dot{h}_6 - A_7 \dot{h}_7 - q_{10} - q_{11} - q_{12} &= 0 \end{aligned} \right\} (3)$$

なお式(3)においては、各管路の流量を $q_1, \dots, q_{13}$ ,  $A_5 \dot{h}_5, \dots, A_7 \dot{h}_7$ を貯留変化量とする。また、各センサ及び節点において表1, 表2に示す正常値及び±5%の許容値(閾値)を設定する。故障診断の際は、これらの許容値を用いて制約条件の正常, 異常の判断を行う。

表1 各管路の流量値及び許容値

|                 | 定常流量 (m <sup>3</sup> /s) | 上限値 (m <sup>3</sup> /s) | 下限値 (m <sup>3</sup> /s) |
|-----------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| q <sub>1</sub>  | 1.4000                   | 1.4700                  | 1.3300                  |
| q <sub>2</sub>  | 0.1231                   | 0.1293                  | 0.1169                  |
| q <sub>3</sub>  | 0.0114                   | 0.0120                  | 0.0108                  |
| q <sub>4</sub>  | 1.2769                   | 1.3407                  | 1.2131                  |
| q <sub>5</sub>  | 0.5000                   | 0.5250                  | 0.4750                  |
| q <sub>6</sub>  | 0.3883                   | 0.4077                  | 0.3689                  |
| q <sub>7</sub>  | 0.3886                   | 0.4080                  | 0.3692                  |
| q <sub>8</sub>  | 0.5000                   | 0.5250                  | 0.4750                  |
| q <sub>9</sub>  | 0.4000                   | 0.4200                  | 0.3800                  |
| q <sub>10</sub> | 0.5000                   | 0.5250                  | 0.4750                  |
| q <sub>11</sub> | 0.5000                   | 0.5250                  | 0.4750                  |
| q <sub>12</sub> | 0.4000                   | 0.4200                  | 0.3800                  |
| q <sub>13</sub> | 1.4000                   | 1.4700                  | 1.3300                  |

表 2 制約条件の閾値

|     | 正常値(m <sup>3</sup> /s) | 上限値(m <sup>3</sup> /s) | 下限値(m <sup>3</sup> /s) |
|-----|------------------------|------------------------|------------------------|
| 節点1 | 0                      | 0.0700                 | -0.0700                |
| 節点2 | 0                      | 0.0255                 | -0.0255                |
| 節点3 | 0                      | 0.0200                 | -0.0200                |
| 節点4 | 0                      | 0.0640                 | -0.0640                |
| 節点5 | 0                      | 0.0250                 | -0.0250                |
| 節点6 | 0                      | 0.0250                 | -0.0250                |
| 節点7 | 0                      | 0.0200                 | -0.0200                |
| 節点8 | 0                      | 2.8000                 | -2.8000                |
| 節点9 | 0                      | 0.0700                 | -0.0700                |

#### 4. 解析結果および考察

実際の送配水システムでは、時間経過に伴い流量値が変化する。故障診断を行う際は、この時間経過を1つの段階として考え、センサの値を段階的に変化させて解析を行う。

##### (1) センサ $q_1$ の故障とセンサ $q_9$ 直前のプロセス異常(漏水)の同時発生

センサが故障した場合センサ値は異常値を出し続け、プロセス異常が発生した場合、漏水によって減少した流量が下流にも伝播するため下流の流量値が時間経過に伴い減少する。以上のことを考慮して各センサ  $q_i$  に表3に示すセンサ値の段階的な変化を設定する。

表 3 センサ値の変化

| 段階 | $q_1$  | $q_2$  | $q_3$  | $q_4$  | $q_5$  | $q_6$  | $q_7$  |
|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1  | 0.1309 | 0.1189 | 0.0099 | 1.2687 | 0.4956 | 0.3866 | 0.3866 |
| 2  | 0.1309 | 0.1189 | 0.0099 | 1.2687 | 0.4956 | 0.3866 | 0.3866 |
| 3  | 0.1309 | 0.1189 | 0.0099 | 1.2687 | 0.4956 | 0.3866 | 0.3866 |
| ⋮  | ⋮      | ⋮      | ⋮      | ⋮      | ⋮      | ⋮      | ⋮      |
| 14 | 0.1309 | 0.1189 | 0.0099 | 1.2687 | 0.4956 | 0.3866 | 0.3866 |

| 段階 | $q_8$  | $q_9$  | $q_{10}$ | $q_{11}$ | $q_{12}$ | $q_{13}$ |
|----|--------|--------|----------|----------|----------|----------|
| 1  | 0.4956 | 0.1121 | 0.4956   | 0.4956   | 0.3965   | 1.3877   |
| 2  | 0.4956 | 0.1121 | 0.4956   | 0.4956   | 0.3965   | 1.3877   |
| 3  | 0.4956 | 0.1121 | 0.4956   | 0.4956   | 0.1121   | 1.3877   |
| ⋮  | ⋮      | ⋮      | ⋮        | ⋮        | ⋮        | ⋮        |
| 14 | 0.4956 | 0.1121 | 0.4956   | 0.4956   | 0.1121   | 1.3877   |

センサ  $q_1$  直前の漏水による流量低下は、下流の  $q_1 \rightarrow q_{12}$  へと伝播する。それゆえ段階的に診断結果は変化し、最終的に一つの診断結果に収束する。最終的な診断結果を図2及び図3に示す。

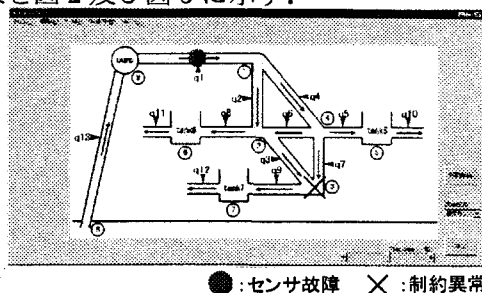


図 2 診断結果(監視画面)

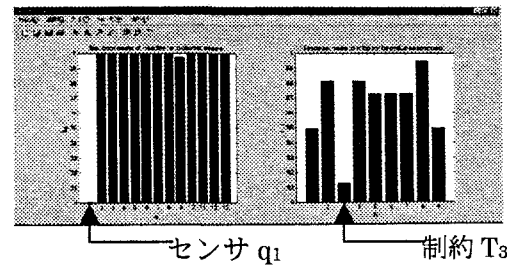


図 3 センサ, 制約の信用度

図3においてセンサ  $q_1$  と制約  $T_3$  の信用度が低く、その他は0.5以上の信用度を保っている。従って、センサ  $q_1$  の故障と制約  $T_3$  の制約異常、つまり漏水が  $T_3$  付近で発生していることが特定できる。

##### (2) センサ $q_{10}$ の故障

診断結果を図4に示す。

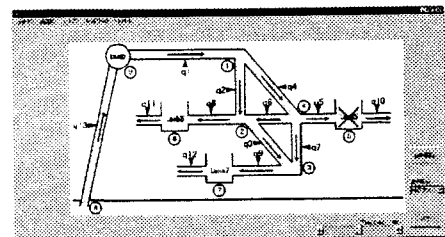


図 4 診断結果(監視画面)

図4の診断結果は、制約  $T_5$  のプロセス異常を示している。診断に用いたデータは、センサ  $q_{10}$  の故障を想定したデータであったが、診断結果はプロセス異常となり診断に誤りが生じた。原因として流量値のみを用いた故障診断を行ったため、このような管網系の末端部では、判断基準となる制約条件が少なく他のセンサとの相互参照が行えず、診断結果に誤りが生じたと考えられる。従って水圧等の他の種類の制約条件を付加することにより解決可能であると考えられる。

#### 5. おわりに

本研究では、免疫型システムによる故障診断システムを構築し、故障診断を行った。解析結果より故障部位の検出には、各水槽付近や末端部における診断に誤りが発生することが認められた。このシステムを用いて故障診断を行う際は、複数の種類の制約条件を導入する必要があると考えられる。今後の課題としては、水位変動、水圧等も考慮し、更に閾値の設定を検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) Y. Ishida, "An Immune Network Approach to Sensor-Based Diagnosis by Self-Organization", Complex Systems, 10, 1, pp.73-90, 1996.