〔論文〕

遺伝的アルゴリズム及び非定常逆解法を用いた管路内の漏れの探索
（第２報、漏れが２箇所の場合）

金　永晙[*1]　宮崎康次[*2]　塚本　寛[*2]

Leak Detection in Pipe Using Genetic Algorithm and Inverse Transient Method：(2nd Report, Leaks at Two Points)

Young-Joon KIM, Koji MIYAZAKI and Hiroshi TSUKAMOTO

Leak detection for leaks at two points was done using the inverse transient method and genetic algorithm. The locations and discharges of each leak were selected as GA parameters for leaks at two points in pipeline. The steady pressures and leak discharges at all nodes were calculated using Newton iteration method. Calculations under assumption of two leaks points were done for not only leaks at two points but also leak at one point in pipeline. Furthermore, the effect of noise in pressure data was discussed, and the leak locations and leak discharges can be predicted precisely even in the case of noisy data.

Keywords：Operation, Leak Detection, Transient flow, Genetic Algorithm, Characteristic Method

１．序論

前報[1]では、非定常逆解法と遺伝的アルゴリズム(GA)を利用して管路中の漏れを探索する方法について報告した。管路中で発生し上下流に伝播される非定常圧力の中には管路中の状態に関する情報が含まれているので、漏れの探索にはこれを利用する。前報では管路中の漏れが１箇所のみの場合を対象としたが、本報では２箇所の漏れに対して探索を行う。また、実際の漏れの数と異なる数の漏れを仮定して探索を行う場合の影響についても調べた。なお、本研究では、GAの適合度を判断する測定圧力として、計算で求めた圧力値を利用している。そこで、実用性を考慮して、ノイズが含まれた圧力値を利用し、探索の精度および計算時間についても検討した。

＊1　九州工業大学　大学院　生命体工学研究科
E-mail：kimu-yonjie2@edu.life.kyutech.ac.jp
＊2　九州工業大学
原稿受付日　平成19年10月10日

２．主な記号

A　：管断面積（m^2）
A_L　：漏れ部の断面積（m^2）
a　：音速（m/s）
C_d　：漏れ部の流出係数
D　：管内径（m）
E　：適応度
f　：管摩擦係数
g　：重力加速度（m/s^2）
G　：GAの現在世代数
G_{max}　：GAの最大世代数
H　：圧力水頭（m）
H_0　：上流タンクの初期圧力水頭(m)
H_L　：漏れ部での圧力水頭（m）
H^m　：管路で測定した圧力水頭（m）
H^c　：計算で求めた圧力水頭（m）
L　：管路長（m）
N　：GA集団数
P_1、P_2、P_3：GAパラメータ

p_k ：GA個体 x_k の選択確率
Q ：流量（m^3/s）
Q_0 ：下流の初期流量（m^3/s）
Q_L ：漏れ部での漏れ量（m^3/s）
q ：GA最大期待値
r_k ：個体 x_k のランキング
r_1、r_2 ：0～1の一様乱数
Re ：Reynolds数
t ：時間（s）
V ：速度（m/s）
x ：管の長さ方向の距離（m）
x_L ：漏れの位置（m）
x_{mea} ：圧力の測定位置（m）
x_k ：GAの k 番目の個体
Δx ：接点間の距離（m）
Π_1、Π_2 ：親個体
π_1、π_2 ：子個体
[添え字]
* ：無次元量

3．非定常流れの計算

3－1 基礎方程式

漏れがない一次元流れの運動および連続方程式は、次のように無次元化できる。

$$\frac{\partial H^*}{\partial x^*}+\frac{H_J}{H_0}\frac{\partial Q^*}{\partial t^*}+\frac{H_J}{H_0}\frac{fQ_0L}{2aDA}Q^*\left|Q^*\right|=0 \quad \cdots(1)$$

$$\frac{\partial H^*}{\partial t^*}+\frac{H_J}{H_0}\frac{\partial Q^*}{\partial x^*}=0 \quad \cdots(2)$$

ここで、

$$H^*=\frac{(H-H_0)}{H_0}, t^*=\frac{t}{L/a}, x^*\frac{x}{L},$$

$$Q^*=\frac{Q}{Q_0}, H_J=\frac{aQ_0}{gA} \quad \cdots(3)$$

である。この基礎方程式に特性曲線法を適用し、管長さ方向の空間は20分割して計算を行った。ここで、非定常流れおよび非定常摩擦抵抗の計算には前報の方法を利用した。

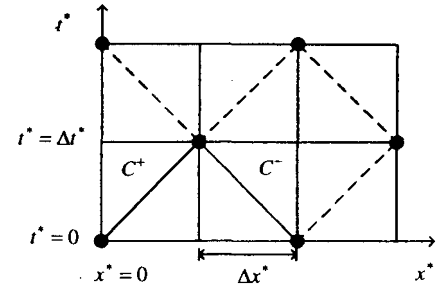


Fig. 1 The $x-t$ grid for calculating unsteady pressure and flow

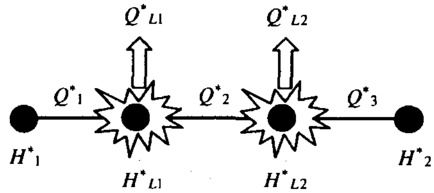


Fig. 2 Leak in pipe

3－2 漏れ部の計算

Fig. 1は、特性曲線法を利用し、空間(x^*)及び時間(t^*)領域で非定常流れを計算する手順を示す。初期状態t^*=0でのx^*軸の各節点における流量及び圧力からC^+、C^-ラインに沿って次の時刻での非定常圧力及び流量が計算できる。

本報では漏れが2箇所あるFig. 2のような場合を考える。このとき、既知である値は上流側の圧力(H^*_1)と下流側の流量(Q^*_3)である。非定常値を計算するために求める必要があるのは漏れ部での圧力(H^*_{L1}、H^*_{L2})と漏れの量(Q^*_{L1}、Q^*_{L2})である。

管路中の漏れは、オリフィスの式で表現し、漏れの大きさと圧力の関数として表す。Fig. 2は管路中に漏れが2箇所存在する場合を表現したものである。このとき、運動および連続方程式から、次のような関係が成立する。

$$\left.\begin{aligned} H^*_{L1}&=H^*_1-C_a\Delta x^*_1Q^*_1\left|Q^*_1\right| \\ H^*_{L2}&=H^*_{L1}-C_a\Delta x^*_2Q^*_2\left|Q^*_2\right| \end{aligned}\right\} \quad \cdots(4)$$

$$Q^*_1=Q^*_{L1}+Q^*_2,\quad Q^*_2=Q^*_{L2}+Q^*_3 \quad \cdots(5)$$

ここで、$C_a = fQ_0^2L/(2gaDA^2H_0)$である。式(5)を式(4)に代入すると次のようになる。

$$H_{L1}^* = H_1^* - C_a\Delta x_1^*(Q_{L1}^* + Q_{L2}^* + Q_3^*)\left|Q_{L1}^* + Q_{L2}^* + Q_3^*\right|$$
$$H_{L2}^* = H_{L1}^* - C_a\Delta x_2^*(Q_{L2}^* + Q_3^*)\left|Q_{L2}^* + Q_3^*\right| \quad \cdots(6)$$

漏れ部での漏れの量は、その点での圧力と関係するオリフィスの式で表現すると次のようになる。

$$Q_{L1}^* = C_{b1}\sqrt{H_{L1}^* + 1}, \quad Q_{L2}^* = C_{b2}\sqrt{H_{L2}^* + 1} \quad \cdots(7)$$

ここで、$C_{b1} = C_dA_{L1}/Q_0\sqrt{2gH_0}$、$C_{b2} = C_dA_{L2}/Q_0\sqrt{2gH_0}$、である。式(7)を(6)に代入し、圧力で整理すると次のようになる。

$$H_{L1}^* = H_1^* - C_a\Delta x_1^*(C_{b1}\sqrt{H_{L1}^*+1} + C_{b2}\sqrt{H_{L2}^*+1} + Q_3^*)\times\left|C_{b1}\sqrt{H_{L1}^*+1} + C_{b2}\sqrt{H_{L2}^*+1} + Q_3^*\right| \quad \cdots(8)$$

$$H_{L2}^* = H_{L1}^* - C_a\Delta x_2^*(C_{b2}\sqrt{H_{L2}^*+1} + Q_3^*)\times\left|C_{b2}\sqrt{H_{L2}^*+1} + Q_3^*\right| \quad \cdots(9)$$

ここで、$X \equiv \sqrt{H^*{}_{L1}+1}$、$Y \equiv \sqrt{H^*{}_{L2}+1}$とし、既知の値である$H^*{}_1 = 0$、$Q^*{}_3 = 1$を代入すると式(8)及び(9)は次のようになる。

$$X^2(1+\Delta x_1^*C_aC_{b1}^2) + \Delta x_1^*C_aC_{b1}^2Y^2 + 2\Delta x_1^*C_aC_{b1}^2XY + 2\Delta x_1^*C_aC_{b1}X + 2\Delta x_1^*C_aC_{b1}Y + \Delta x_1^*C_a - 1 = 0 \quad \cdots(10)$$

$$Y^2(1+\Delta x_2^*C_aC_{b2}^2) - X^2 + 2\Delta x_2^*C_aC_{b2}Y + \Delta x_2^*C_a = 0 \quad \cdots(11)$$

式(10)と(11)をそれぞれ$f(X,Y)$、$g(X,Y)$と置けば、次のような関係が得られる。

$$f(X,Y) \equiv X^2(1+\Delta x_1^*C_aC_{b1}^2) + \Delta x_1^*C_aC_{b1}^2Y^2 + 2\Delta x_1^*C_aC_{b1}^2XY + 2\Delta x_1^*C_aC_{b1}X + 2\Delta x_1^*C_aC_{b1}Y + \Delta x_1^*C_a - 1 = 0 \quad \cdots(12)$$

$$g(X,Y) \equiv Y^2(1+\Delta x_2^*C_aC_{b2}^2) - X^2 + 2\Delta x_2^*C_aC_{b2}Y + \Delta x_2^*C_a = 0 \quad \cdots(13)$$

$f(X,Y)$=0および$g(X,Y)$=0の解を求めるためにニュートン法を適用する[2][3]。

$$\begin{pmatrix} \dfrac{\partial f(X^{(n)},Y^{(n)})}{\partial X} & \dfrac{\partial f(X^{(n)},Y^{(n)})}{\partial Y} \\ \dfrac{\partial g(X^{(n)},Y^{(n)})}{\partial X} & \dfrac{\partial g(X^{(n)},Y^{(n)})}{\partial Y} \end{pmatrix}\begin{pmatrix} X' \\ Y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -f(X^{(n)},Y^{(n)}) \\ -g(X^{(n)},Y^{(n)}) \end{pmatrix} \quad \cdots(14)$$

ここで、$X' = X^{(n+1)} - X^{(n)}$、$Y' = Y^{(n+1)} - Y^{(n)}$、

$$\frac{\partial f(X^{(n)},Y^{(n)})}{\partial X} = 2(1+\Delta x_1^*C_aC_{b1}^2)X^{(n)} + 2\Delta x_1^*C_aC_{b1}^2Y^{(n)} + 2\Delta x_1^*C_aC_{b1} \quad \cdots(15)$$

$$\frac{\partial f(X^{(n)},Y^{(n)})}{\partial Y} = 2\Delta x_1^*C_aC_{b1}^2Y^{(n)} + 2\Delta x_1^*C_aC_{b1}^2X^{(n)} + 2\Delta x_1^*C_aC_{b1} \quad \cdots(16)$$

$$\frac{\partial g(X^{(n)},Y^{(n)})}{\partial X} = 2X^{(n)} \quad \cdots(17)$$

$$\frac{\partial g(X^{(n)},Y^{(n)})}{\partial Y} = 2(1+\Delta x_2^*C_aC_{b2}^2)Y^{(n)} + 2\Delta x_2^*CaC_{b2} \quad \cdots(18)$$

初期推定値$X^{(0)}$、$Y^{(0)}$からスタートして、反復公式(14)によりX'、Y'を求め、$X^{(n)}$、$Y^{(n)}$を逐次改良していく。X'とY'が必要な精度になるまで計算を繰り返して、漏れ部の圧力と漏れ量を求める。

４．非定常逆解法（Inverse transient method）

非定常逆解法は、逆解法と非定常流れ解析を結合した漏れの探索手法である。給水管網の一般的な問題では、各節点の流出量と管路の直径、材質などの特性は既知で、求められるものは節点での圧力と各管路での流量である。一方、給水管網の逆解法では、任意の節点での圧力と流量データから逆に節点での流出流量を求める。さらに、非定常逆解法は、管路中の節点で非定常圧力を測定し、解析で求めた非定常圧力と比較して、その差を小さくすることで漏れの位置と大きさを探し出す方法である。

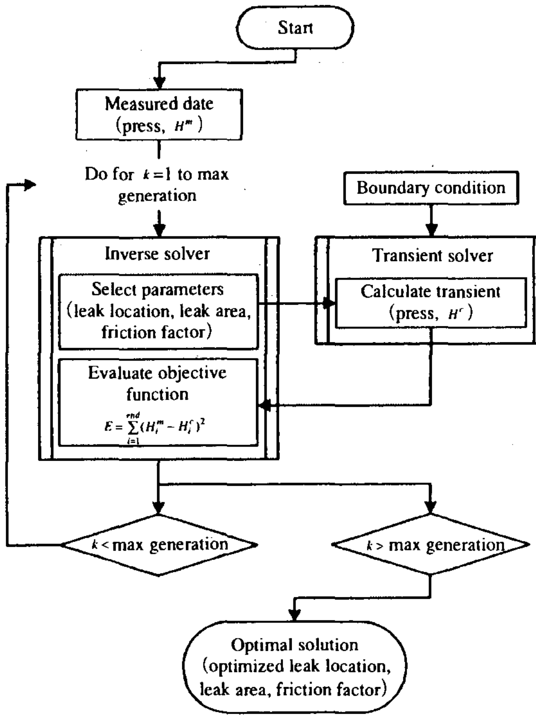


Fig. 3　Flow chart of inverse transient method

定常圧力を利用する定常逆解法(The inverse steady-state method)では、すべての管路の正確な管摩擦抵抗を把握することが必要である。しかし、実際に定常状態の正確な管摩擦抵抗を把握することは困難で、Pudar[4]とLiggett[5]は非定常値を利用する非定常逆解法を導入してこの問題を解決した。Fig. 3は非定常逆解法の概略を示す。非定常逆解法は、逆解法(inverse solver)と非定常流れ解法(transient solver)から構成されている。逆解法は最適化の過程で、非定常流れ解法は非定常流れ解析を行う過程である。

まず、圧力測定データを逆解法のプロセスに読み込む。そして、パラメータを任意の値に設定して、多数の初期集団を形成する。この集団の値を非定常流れ解法に伝達する。非定常流れ解法では、逆解法からの初期集団の値を用いて非定常流れの解析を行い、計算で求めた圧力データを逆解法に再伝達する。逆解法では、受取った計算圧力データと測定圧力データの差を目的関数として評価する。そして、新しいパラメータを持つ集団を作り、これらの過程を繰り返して、最終的に最適解を導出する。

本研究では、最適化の過程である逆解法の手法として、遺伝的アルゴリズム(GA)を利用した。パラメータとしては、漏れの位置、漏れの大きさ、管摩擦係数を選択し、その値を変更しながら、計算された圧力と測定圧力の差がある値以下になるまで繰り返した。

5．遺伝的アルゴリズム（Genetic Algorithm）

遺伝的アルゴリズムには前報と同様に、実数値GAを利用し、選択法としては、Joinesらが提案した実数値コーディング用の正規化幾何学的ランキング法(normalized geometric ranking method)[6]を利用した。個体x_kのランクがr_k(r_k = 1、2、…、N)となった場合、個体x_kの選択確率p_kは以下のように決定される。

$$p_k = q'(1-q)^{r_k-1} \quad \cdots(19)$$

ここで、

$$q' = \frac{q}{1-(1-q)^N} \quad \cdots(20)$$

であり、Nは集団の個体数、qは最大期待値で、最優秀な個体に与える選択率である。

遺伝的オペレータは既存の世代の個体を元として新しい個体を作る過程である。主なオペレータとして交叉と突然変異がある。交叉は、二つの個体を利用してまた二つの個体を生産する。一方、突然変異は、一つの個体から新しい一つの個体を生成する。

5－1　交叉（crossover）

実数型GAの個体は、パラメータによって構成されている。三つのパラメータ(P_1、P_2、P_3)を持つ親個体をΠ_1とΠ_2とすると、

$$\Pi_1 = [P_1(\Pi_1) \quad P_2(\Pi_1) \quad P_3(\Pi_1)]$$

$$\Pi_2=[P_1(\Pi_2)\quad P_2(\Pi_2)\quad P_3(\Pi_2)]$$

のように表現できる。本研究では、実数値GAに以下のような交叉を適用した[4]。

単純交叉(Simple crossover)は、二つの親を選び、単純一点交叉を行う。まず、一点交叉を行う常数iをランダムに選び、その常数以降のパラメータは二つの親同士に入れ換える。新しく生産される子個体をπ_1、π_2にすると

$$\pi_1=\begin{cases}[P_1(\Pi_1)\quad P_2(\Pi_2)\quad P_3(\Pi_2)] & (i\text{=1の場合})\\ [P_1(\Pi_1)\quad P_2(\Pi_1)\quad P_3(\Pi_2)] & (i\text{=2の場合})\end{cases}$$

$$\pi_2=\begin{cases}[P_1(\Pi_2)\quad P_2(\Pi_1)\quad P_3(\Pi_1)] & (i\text{=1の場合})\\ [P_1(\Pi_2)\quad P_2(\Pi_2)\quad P_3(\Pi_1)] & (i\text{=2の場合})\end{cases}$$

となる。ここで、$1\leq i\leq$(パラメータ数−1)の常数である。

算術交叉(Arithmetic crossover)は、0～1での一様乱数r_1を選び、親Π_1とΠ_2に次のように子個体π_1、π_2を生成する：

$$\pi_1=r_1\times\Pi_1+(1-r_1)\times\Pi_2$$

$$\pi_2=(1-r_1)\times\Pi_1+r_1\times\Pi_2$$

ヒューリスティック交叉(Heuristic crossover)は、二つの親個体を適応度によって優秀な個体と劣等な個体に分け、次のように交叉を行う：

$$\pi_1=r_1\times(b_t-w_t)+b_t$$

$$\pi_2=b_t$$

ここで、親個体Π_1とΠ_2の中で適応度が優秀な方がb_tで、劣等の方がw_tである。

5－2　突然変異（mutation）

一様突然変異(Uniform mutation)は、親個体を選び、一様確率分布に基づいて一つのパラメータ(mp)を選び置換する過程である。親個体を$\Pi=[P_1(\Pi)\ P_2(\pi)\ P_3(\Pi)]$とすれば、子個体は、

$$\pi=[P_1(\Pi)\quad P_2(\pi)\quad P_3(\Pi)]\qquad (mp\text{=2の場合})$$

となる。ここで、

$$P_2(\pi)=left(P_2)+r_1\times right(P_2)、$$

パラメータP_2の範囲は、$left(P_2)\leq P_2\leq right(P_2)$、である。

非一様突然変異(Non-uniform mutation)は、

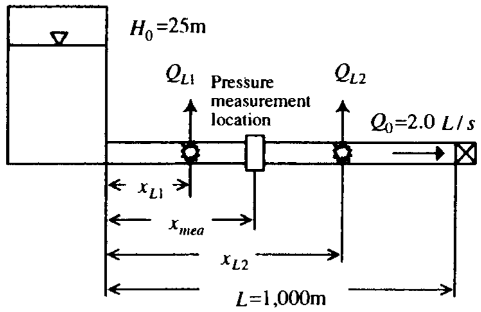


Fig. 4　Pipeline connecting an upstream reservoir and downstream valve

親個体のパラメータを一つ選択し、非一様確率分布に基づいて置換する：

$$\pi=[P_1(\Pi)\quad P_2(\Pi)\quad P_3(\pi)]\qquad (mp\text{=3の場合})$$

$$P_3(\pi)=\begin{cases}P_3+right(P_3)-P_3(\Pi)f(G) & (r_1\leq 0.5)\\ P_3+left(P_3)-P_3(\Pi)f(G) & (r_1\geq 0.5)\end{cases}$$

$$f(G)=r_2\left(1-\frac{G}{G_{\max}}\right)^b$$

ここで、Gは現在の世代数、$G_{\max}$は最大世代数、bは形状係数である。

多非一様突然変異(Multi-non-uniform mutation)は、非一様突然変異を選択された親個体の全パラメータに適用する過程である。

環境突然変異(Boundary mutation)では、親個体のパラメータの中で一つを選び、そのパラメータの上限値あるいは下限値に置換する：

$$\pi=[P_1(\pi)\quad P_2(\Pi)\quad P_3(\Pi)]\qquad (mp\text{=1の場合})$$

$$P_1(\pi)=\begin{cases}left(P_1) & (r_1\leq 0.5\text{ の場合})\\ right(P_1) & (r_1\geq 0.5\text{ の場合})\end{cases}$$

ここで、$left(P_1)$と$right(P_1)$はパラメータP_1の上下限値である。

6．供試管路

Fig. 4は本報で対象とする管路系の概略である。上流側には一定水位(H_0=25m)の貯水タンクが設置され、作動流体である水が供給されている。管路の長さL=1,000m、過渡流れは下流のバルブを0.05秒で閉鎖することによって発生

Table 1 The leak conditions : x^*_{mea}=0.2, 0.4, 0.6, 0.8

Number of leaks	GA parameters	True leak condition
1	$x^*_L, C_dA_L/A$	x^*_L=0.2, 0.4, 0.6, 0.8 C_dA_L/A=0.001
2	$(x^*_L)_1$, $(x^*_L)_2$ $(C_dA_L/A)_1$, $(C_dA_L/A)_2$	$(x^*_L)_1$=0.3, $(x^*_L)_2$=0.7, $(C_dA_L/A)_1=0.0004$ $(C_dA_L/A)_2=0.0006$

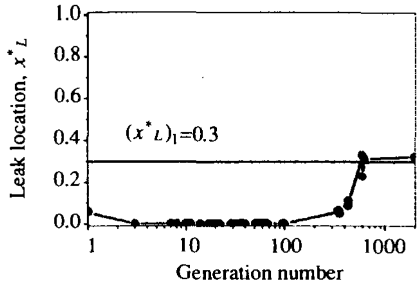
される。下流のバルブを通過する初期流量Q_0は2.0 L/sで、レイノルズ数は11,160であった。音速aは1,300 m/s、定常管摩擦係数fは0.0302とする。漏れは管路中に２箇所存在するものとした。これに対して、GAの染色体は、２箇所の漏れの位置$(x^*_L)_1$、$(x^*_L)_2$、漏れの大きさ$(C_dA_L/A)_1$、$(C_dA_L/A)_2$で構成した。ここで、各パラメータの範囲は漏れの位置を$0 \leq x^*_L \leq 1$として、管路全体を探索できるようにした。漏れの大きさも$0 \leq C_dA_L/A \leq 0.1$として、管の直径の10%までの漏れを探索できるようにした。境界条件である上流の圧力H_0と下流の流量Q_0は既知である。一方、１箇所のみに漏れが存在する場合には、管路中に漏れが１箇所に位置すること以外の条件は２箇所の場合と同一である。

Table 1 に本報で対象とする実際の漏れの位置および漏れの量を示す。

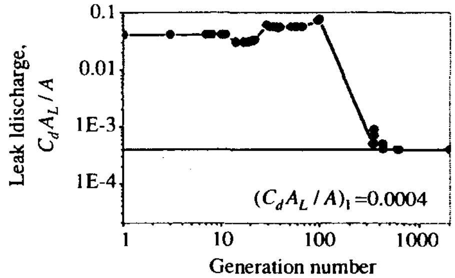
７．結果および考察

７－１ 漏れが２箇所に存在する場合

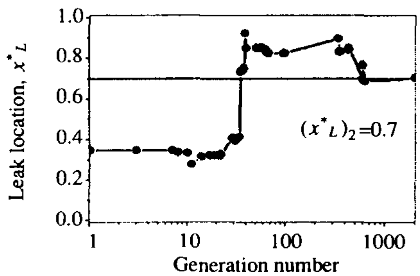
管路中の漏れが２箇所で、圧力測定は１箇所のときの結果について検討した。実際の漏れの位置と大きさはTable 1 に示される２箇所である。GAのパラメータはTable 1 のように２箇所の漏れの位置と漏れの大きさにした。GAの初期集団数は120、最大世代数は2,000、突然変異（一様突然変異、非一様突然変異、多非一様突然変異、環境突然変異）は世代ごとにそれぞれ３回、交叉（単純交叉、算術交叉、ヒューリスティック交叉）も３回ずつの条件で、計算を行った。



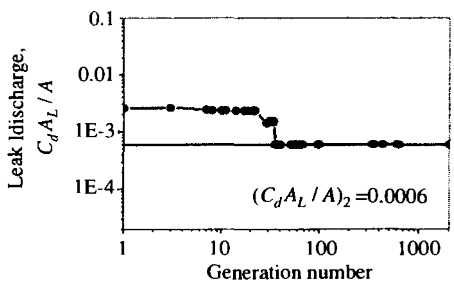
(a) Calculated leak location $(x^*_L)_1$



(b) Calculated leak discharge $(C_dA_L/A)_1$



(c) Calculated leak location $(x^*_L)_2$



(d) Calculated leak discharge $(C_dA_L/A)_2$

Fig. 5 Results of leak detection without noise : x^*_{mea}=0.8

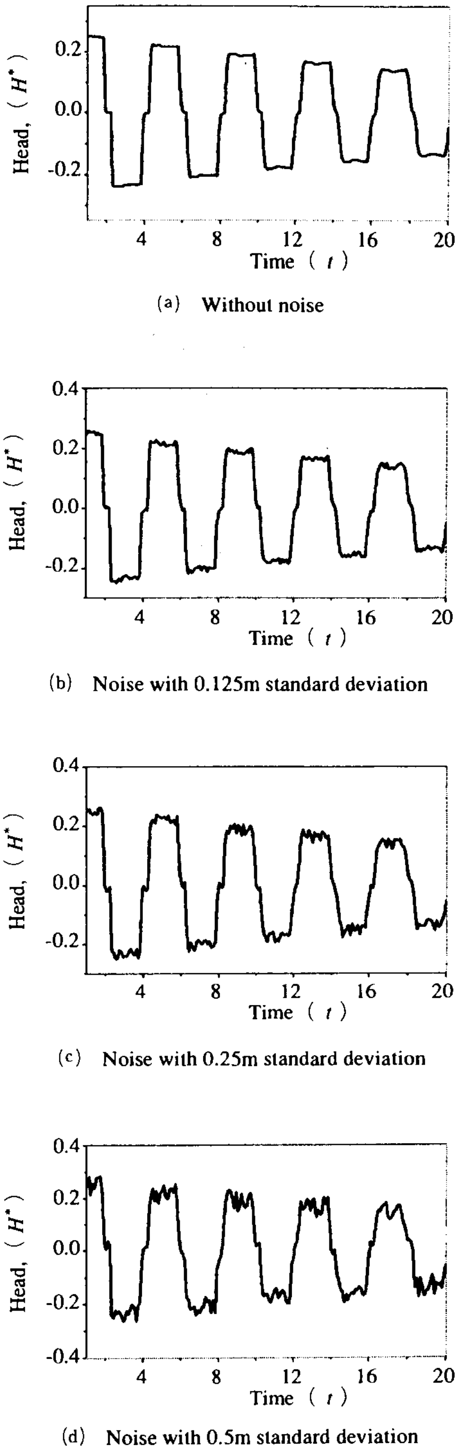
この時、dell-8400(Pentium 4 CPU、3.4GHz、2G RAM)での平均計算時間は39分51秒であった。Fig. 5に最適化の過程を示す。図のように、２箇所の漏れの位置と漏れ量をほぼ完全に探索できた。

７－２　測定圧力にノイズの含まれる場合

GAの適合度を評価するための目的関数には、測定した圧力値H^mとGAパラメータから計算して求めた圧力値H^cの二乗差を利用した。

$$E=\sum_{i=1}^{end}(H_i^m-H_i^c)^2 \qquad \cdots(21)$$

ここで、H^mは管路中の測定圧力値である。本研究では、この測定圧力として、圧力センサによって測定した値ではなく、数値計算で求めた値を利用した。圧力や流量の測定データには、ノイズが含まれる可能性が高い。そこで、実際の圧力データのような効果を与えるために、ノイズを含まない滑らかなデータに平均値0、標準偏差0.125、0.25、0.5mのランダムなノイズを加えた圧力値をH^mとして、計算を行った。各ノイズが含まれる圧力とノイズのない圧力を比較したものがFig. 6である。H^mにノイズが含まれる場合にも、漏れの位置、漏れ量、GAパラメータなどはノイズがない場合と同一な状況で探索した。初期集団数120、最大世帯数2,000で、突然変異および交叉はそれぞれ３回行われた。各ノイズの加わったときの探索の結果をTable 2に示す。この結果から、異なる標準偏差のノイズが加わった圧力値が漏れの探索に及ぼす影響は大きくないことが確認できる。計算時間に関しては、ノイズの標準偏差が大きくなることによって増加するが、ノイズがないときの計算時間は標準偏差0.125、0.25mのノイズが含まれたときの時間より長いことから、計算時間はノイズの影響よりはGAの計算過程によって決定されると考えられる。Fig. 7は各標準偏差のノイズを含んだ圧力値を測定圧力として利



(a) Without noise
(b) Noise with 0.125m standard deviation
(c) Noise with 0.25m standard deviation
(d) Noise with 0.5m standard deviation

Fig. 6　Noise with 0.5m standard deviation：$x^*_{mea}=0.8$

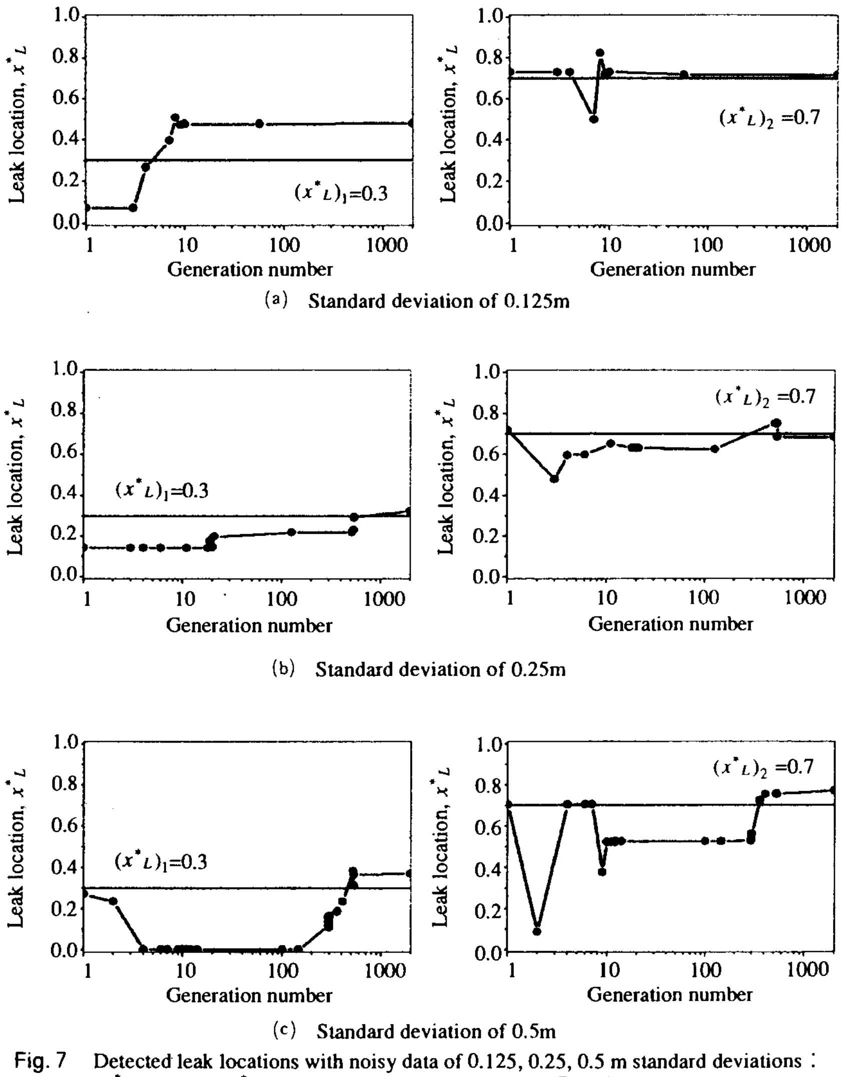
Table 2 The results of leak detection with pressure data of standard deviations : $(x^*_L)_1 = 0.3$, $(x^*_L)_2 = 0.7$, $(C_dA_L/A)_1 = 0.0004$, $(C_dA_L/A)_2 = 0.0006$, $x^*_{mea} = 0.4$

Detected results \ Standard deviation	0.125	0.25	0.5	No noise
$(x^*_L)_1$	0.4789	0.3240	0.3693	0.2870
$(x^*_L)_2$	0.7190	0.6847	0.7729	0.6878
$(C_dA_L/A)_1$	0.0008	0.0004	0.0003	0.0004
$(C_dA_L/A)_2$	0.0002	0.0006	0.0006	0.0006
Computing time (seconds)	724	894	1,690	1,407

用した場合の探索過程を示す。探索結果から、ノイズが含まれた圧力データを利用しても漏れの探索には問題ないことが確認できる。

7－3 漏れが仮定と異なる場合

PudarやLiggettらが提案した非定常逆解法[4][5][7]〜[9]を利用した給水管網の漏れの探索方法では、漏れがいくつかの節点だけで発生することにして探索を行っている。もし、漏れが節点ではなく節点間の管路で発生する場合には、漏れの位置を探索することが難しい。本研究の探索方法



(a) Standard deviation of 0.125m

(b) Standard deviation of 0.25m

(c) Standard deviation of 0.5m

Fig. 7 Detected leak locations with noisy data of 0.125, 0.25, 0.5 m standard deviations : $(x^*_L)_1$=0.3, $(x^*_L)_2$=0.7, $(C_dA_L/A)_1$=0.0004, $(C_dA_L/A)_2$=0.0006, x^*_{mea}=0.4

Table 3 Percents of detecting leak location less than 5% difference : under assumption of 1 leak point

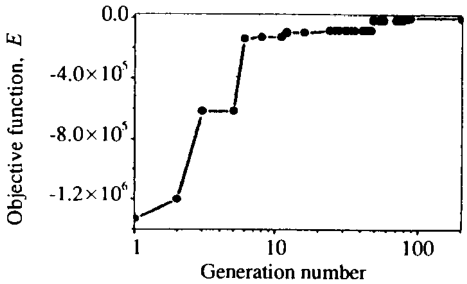
x^*_L \ x^*_{mea}	0.25	0.5	0.75	*Mean*
0.2	94	75	100	89.7
0.4	99	75	100	91.3
0.6	89	63	71	74.3
0.8	100	77	86	87.7
Mean	95.5	72.5	89.3	85.8

Table 4 Percents of detecting leak location less than 5% difference : under assumption of 2 leak points

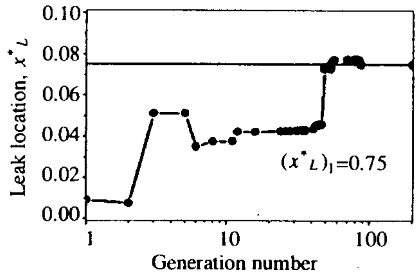
x^*_L \ x^*_{mea}	0.25	0.5	0.75	*Mean*
0.2	98	61	98	85.7
0.4	94	66	85	81.7
0.6	81	52	51	61.3
0.8	89	55	42	62.0
Mean	90.5	58.5	69.0	72.7

は、すべての管路で発生する漏れを探索できる。その代わり、計算の事前に何箇所の漏れを仮定するかを決め、GAのパラメータを確定することが必要である。

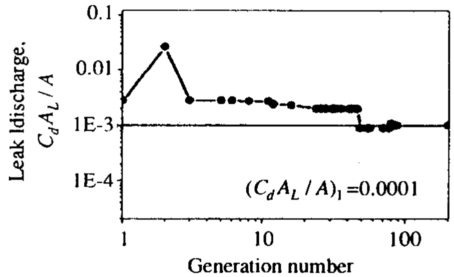
前報では、実際の漏れが１箇所だけの場合に対して１箇所の漏れを仮定して計算が行われた。本報では、漏れが２箇所にあると仮定し、実際の２箇所の漏れを探索した。しかし、実際には、漏れが１箇所しかない場合もある。そこで、２箇所の漏れを仮定し、１箇所の漏れを探索する場合について検討する。Table 1 の１箇所の漏れに対して、GAのパラメータは２箇所の漏れの条件で探索を行った。１箇所の漏れに対して、漏れを２箇所あると仮定した場合と１箇所として探索した場合を比較するために、漏れの位置と圧力測定位置を変化させて100回計算し、精度と計算時間を比較した。Table 3 と 4 は漏れの位置と圧力測定場所を変化させ、それぞれの場合に対して100回ずつ探索を行って実際の漏れの位置を誤差5％以内の範囲で探し



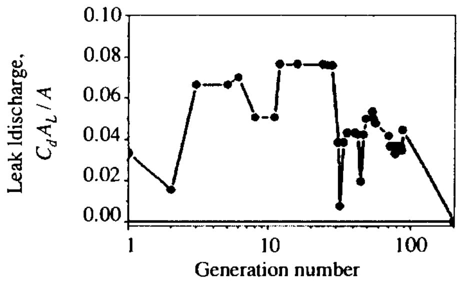
(a) Objective function (E)



(b) Calculated leak location $(x^*_L)_1$



(c) Calculated leak discharge $(C_dA_L/A)_1$



(d) Calculated leak discharge $(C_dA_L/A)_2$

Fig. 8 Process of leak detection under assumption of 2 leak points for 1 leak point : x^*_L=0.75, C_dA_L/L=0.001, x^*_{mea}=0.6

た回数を示したものである。Table 3は1箇所の漏れに対して1箇所の漏れを仮定した結果で、Table 4は2箇所に漏れがあると仮定した探索結果である。

平均的に5%以内の精度で漏れの位置を探索できた割合は、1箇所の漏れを仮定した場合で85.8%、2箇所とした場合には72.7%であった。計算時間は、1箇所と仮定した場合が一回の平均計算時間が29秒、2箇所の場合は125秒と、2箇所の漏れを仮定した場合の方が1箇所の場合より約4.3倍の時間を要した。1箇所の漏れに対して2箇所の漏れを仮定し、漏れを探索した過程を示したのがFig. 8である。この結果から、実際には1箇所の漏れの場合に対して、2箇所の漏れを仮定して計算しても、計算の精度と計算速度は落ちるものの、探索可能なことが確認された。

8. 結論

漏れが2箇所ある場合に対して非定常流れ解析とGAを利用した最適化によって漏れの探索を行った。その結果、次のような結論を得た。

① 漏れが2箇所にある場合にも漏れの探索ができた。

② 漏れの探索のために使われた測定圧力値にノイズが含まれた場合にも漏れの探索はノイズがない場合と大きな差はなかった。

③ 漏れを2箇所あると仮定しても1箇所の漏れも探索できた。

<参考文献>

(1) 金永晙・宮崎康次・塚本寛，遺伝的アルゴリズム及び非定常逆解法を用いた管路内の漏れの探索，ターボ機械，第36巻3号（2008），173-181

(2) Press, W. H., et al., Numerical Recipes in C : The Art of Scientific Computing (1992), 362-265, Cambridge University Press

(3) 高桑哲男，配水管網の解析と設計（1978），38-46，森北出版

(4) Pudar, R. S., and Liggett, J. A., Leaks in pipe networks, J. Hydraulic engineering, Vol.118, No.7 (1992), 1031-1046

(5) Liggett, J. A., and Chen, L.-C., Inverse transient analysis in pipe networks, J. Hydraulic engineering, Vol.120, No.8 (1994), 934-955

(6) Michalewicz, Z., Genetic Algorithms+Data Structures =Evolution Programs (1994), AI Series. Springer-Verlag, New York

(7) Vitkovsky, J. P., Simpson, A., and Lambert, M., Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms, J. Water Resources Planning and Management, Vol.126, No.4 (2000), 262-265

(8) Nash, G. A., and Kamey, B. W., Efficient Inverse Transient Analysis in Series Pipe Systems, J. Hydraulic engineering, Vol.125, No.7 (1999), 761-764

(9) Kapelan, Z. S., Savic, D. A., and Walters, G. A., A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks, J. Hydraulic research, Vol.41, No.5 (2004), 481-492