

[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

金 永 峻*¹ 宮崎 康 次*² 塚 本 寛*²

Leak Detection in Pipe Using Genetic Algorithm and Inverse Transient Method

Young-Joon KIM, Koji MIYAZAKI and Hiroshi TSUKAMOTO

An inverse transient method by genetic algorithm (GA) was applied to leak detection in pipe line. Transient flow caused by valve operation was calculated using the characteristics method. Measured pressure waves at one or two points and calculated pressure waves at those points are evaluated to minimize the difference between measured and calculated values. The location and discharge of leak were selected as calibration parameters of GA. The unsteady pipe friction was approximated to be quasi-steady for the calculation of unsteady pressure. Moreover, the effect of the errors in the pipe friction factors on leak detection was discussed. As the result of the present study, leak detection was found to be possible at the node as well as any point in the pipeline. Furthermore, the pressure data at multi-points for GA method was found to be effective to improve the leak detection accuracy.

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

1. 序論

多くの配水システムにおいて、かなりの用水が漏れによって管路から失われているのが現状である。漏れは貴重な資源と資金を浪費し、公衆保健衛生にも悪影響をもたらす可能性がある。その上、搬送流体が危険なものならば、漏れに伴う危険は高くなる。したがって、管路における漏れの検出は重要な問題として扱われ、いくつかの漏れの検出方法が開発されている。音響を利用する単純な方法として、漏れから発生する雑音または振動を調べるために聴診器を使うことがある。この方法の成否は、オペレーターの経験、漏れの大きさおよび管路システムの特性などに依存し、かなりの専門知識と努力を必要とする。それゆえ、単純、かつ信頼できる漏れの探索方法の確立が期待されている。

流体システムで発生した非定常圧力波は定常状態に至るまで管路システムの上下流を往復する。反射された圧力波にはシステムの状態に関する情報が含まれている。漏れによって圧力は減衰され、反射する圧力波から漏れの重要な情報を得ることが可能である。このような圧力波を測定および分析することで漏れの大きさと位置を探す方法がいくつかある。Pudarar⁽¹⁾は定常状態の配水システムの漏れを探索するために逆解法を利用した。配水システムにおいて、通常の解析法では各節点での流出量が既知で、求められるのは接点での圧力と管路での流量である。一方、逆解法は適当な数の圧力から節点の流出量として漏れを探す方法である。この計算には正確な管摩擦係数を必要とする。Liggettら⁽²⁾は非定常逆解法を漏れの探索に利用した。彼らはLevenberg-Marquardt (LM) 法を利用し、測定データと解析データの差を最小化した。しかし、LM法は、収束しない可能性もあり、局所最適解に収束する弱点を持っている。Vitkovskyら⁽³⁾

* 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5月28日

は、この問題の最適解を Genetic Algorithm (GA) で求め、漏れを節点のみに限定し、各管路の管摩擦係数と接点での漏れの大きさを GA のパラメータとした。疑わしい接点の数が増加するなら、最適化には複雑な GA パラメータとより多くの探索時間を必要とする。Kim⁽⁴⁾ はインパルス応答法で非定常流れを計算し、GA のパラメータとして漏れの位置と漏れの大きさを設定した。

本研究では、漏れの探索のために、非定常逆解法を利用した。漏れの位置、大きさおよび管摩擦係数を GA パラメータとし、いくつかの点での圧力測定データと特性曲線法で計算した圧力の差を最小化することで漏れの位置と大きさの値を探索した。さらに、漏れの位置と圧力測定位置の関係が探索に及ぼす影響についても分析した。また、管摩擦係数の影響についても調べた。

2. 主な記号

- A : 管断面積 (m²)
- A_L : 漏れ部の断面積 (m²)
- a : 音速 (m/s)
- C* : Vardy のせん断減衰係数
- C_d : 漏れ部の流出係数
- D : 管内径 (m)
- f : 管摩擦係数
- f_s : 定常管摩擦係数
- f_u : 非定常管摩擦係数
- g : 重力加速度 (m/s²)
- H : 圧力水頭 (m)
- H₀ : 上流タンクの初期圧力水頭 (m)
- k : Brunone の摩擦係数
- L : 管路長 (m)
- Q : 流量 (m³/s)
- Q₀ : 下流の初期流量 (m³/s)
- Re : Reynolds 数

- t : 時間 (s)
- V : 速度 (m/s)
- x : 管の長さ方向の距離 (m)
- Δx : 接点間の距離 (m)
- [添え字]
- * : 無次元量

3. 非定常流れの計算

3-1 特性曲線法

漏れがない一次元流れの運動および連続方程式は、

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad \dots(1)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad \dots(2)$$

である。この基礎微分方程式は次のような変数で無次元化することが出来る。

$$H^* = \frac{(H - H_0)}{H_0}, \quad t^* = \frac{t}{L/a}, \quad x^* = \frac{x}{L}, \quad Q^* = \frac{Q}{Q_0} \quad \dots(3)$$

基礎微分方程式は、特性曲線法により以下の 4 常微分方程式になる。

$$\frac{dH^*}{dt^*} + \frac{1}{F} \frac{dQ^*}{dt^*} + RQ^*|Q^*| = 0 \quad \dots(4)$$

$$\frac{dx^*}{dt^*} = 1 \quad \dots(5)$$

$$-\frac{dH^*}{dt^*} + \frac{1}{F} \frac{dQ^*}{dt^*} + RQ^*|Q^*| = 0 \quad \dots(6)$$

$$\frac{dx^*}{dt^*} = -1 \quad \dots(7)$$

ここで、 $H_j = aQ_0 / (gA)$ 、 $F = H_0 / H_j$ 、 $R = fQ_0 L / (2aDAF)$ である。式(4)と(6)はそれぞれ式(5)と(7)の条件下で満足される。

3-2 非定常摩擦抵抗

非定常流れの解析にも管路抵抗として定常摩擦抵抗成分のみが使用されることが多い。しかし、実際の圧力と定常摩擦抵抗成分だけで計算

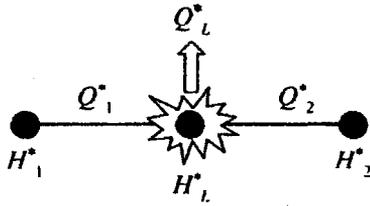


Fig. 1 Leak in pipe

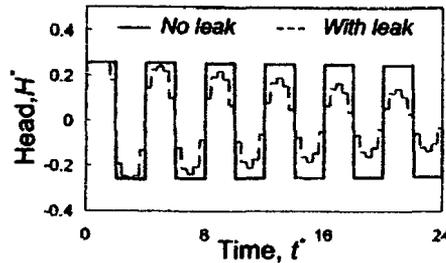


Fig. 2 Damping effect of leak on transient flow ; $x_{mea}^*=1.0, x_L^*=0.2, C_d A_L / A = 0.008$

した圧力の間では、時間の経過と共にその差が大きくなる。層流において、周波数依存摩擦抵抗損失は鋭い圧力波形と付加圧力損失の主な原因になる⁽⁵⁾。非定常摩擦抵抗モデルはいくつかあるが、本研究では、非定常摩擦抵抗成分 f_u を局所加速度 $\partial V / \partial t$ と対流項 $V(\partial V / \partial x)$ で評価したBrunoneモデルをすべての非定常条件にも適用可能としたSimpsonらの式⁽⁶⁾

$$f = f_s + \frac{kD}{V|V|} \left\{ \frac{\partial V}{\partial t} + a \cdot \text{sign}(V) \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right\} \quad \dots(8)$$

を用いた。ここで、 $\text{sign}(V) = +1 (V \geq 0)$ 、 $-1 (V < 0)$ 、Brunoneの摩擦抵抗係数 k は

$$k = \sqrt{C^*} / 2 \quad \dots(9)$$

また、Vardyのせん断減衰係数 C^* は

$$C^* = \begin{cases} 0.00476 & \text{: 層流} \\ 7.41 / \text{Re}^{\log(14.3 / \text{Re}^{0.05})} & \text{: 乱流} \end{cases}$$

である。

3-3 漏れの処理

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。

$$\begin{aligned} Q_L^* &= \frac{C_d A_L}{Q_0} \sqrt{2gH_0(H_L^* + 1)} \\ &= \frac{C_d A_L}{Q_0} \sqrt{2gH_0} \sqrt{H_L^* + 1} \end{aligned} \quad \dots(10)$$

Fig. 1は漏れのある接点を表現したものである。運動および連続方程式から、次のような関係が成立する。

$$H_L^* = H_1^* - R \Delta x^* Q_1^* |Q_1^*| \quad \dots(11)$$

$$Q_1^* = Q_L^* + Q_2^* \quad \dots(12)$$

式(10)と(12)を式(11)に代入すると H_L^* に対する

方程式が得られる。境界条件として、上流の圧力(H_1^*)と下流の流量(Q_2^*)が与えられれば、漏れ部での圧力(H_L^*)と漏れの量(Q_L^*)を求めることが出来る。

$$\begin{aligned} H_L^* &= H_1^* - C_b \{ C_a^2 (H_L^* + 1) + Q_2^{*2} \\ &\quad + 2C_a Q_2^* \sqrt{H_L^* + 1} \} \end{aligned} \quad \dots(13)$$

ここで、 $C_a \equiv C_d A_L \sqrt{2gH_0} / Q_0$ 、 $C_b \equiv R \Delta x^*$ である。境界条件(H_1^* 、 Q_2^*)が同一であるとき、漏れ部での圧力と流量は漏れ部の断面積 A_L と漏れの位置 Δx^* によって決まることが確認できる。

4. 非定常逆解法 (Inverse transient method)

配水管路網システムの一般的な問題では、各接点の流出量とシステムの特性は既知の値で、求められるものは接点での圧力と接点間の管路での流量である。一方、逆解法では、任意の接点での圧力データと境界条件から接点での流出流量を求めることになる。さらに、非定常逆解法は、解析で得られた非定常圧力と実際に測定した圧力値の差を小さくすることで漏れを探す方法である。漏れが非定常圧力波形に与える影響を示したのがFig. 2である。ここで、圧力測定点 $x_{mea}^* = 1.0$ で、漏れの位置 $x_L^* = 0.2$ 、漏れの大きさ $C_d A_L / A = 0.008$ である。

非定常逆解法による漏れの探索を行うために管路末端のバルブを閉めることで非定常圧力を

発生させた。その時、システムのいくつかの場所における圧力や流量の測定が必要になる。任意の場所での圧力計算は管路の特性、漏れの位置、そして漏れの大きさなどでモデル化できる。本研究では、漏れの位置、漏れの大きさ、管摩擦係数などをパラメータとし、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, GA)

GAは、生物の進化から学んだ進化型計算パラダイムであり、状態空間のすべての地域を探索し、突然変異、交叉、選択などの操作を通じて線形および非線形問題を解く方法である。

本研究では、HouckらによるMATLABのためのGenetic Algorithm Optimization Toolbox⁽⁷⁾を利用した。このGAドライバは一般に公開され入手可能なものを改良した。染色体には実数値GAを利用し⁽⁸⁾、選択方法としてnormalized geometric ranking methodを採用した。Fig. 3に本研究におけるGAの流れ図を示す。

6. 供試管路

Fig. 4は事例としたシステムの概略である。作動流体を水とし、一定の水位 ($H_0=25\text{m}$) の貯水タンク、管路、バルブで構成された管路システムである。

管路の長さ $L=1,000\text{m}$ 、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される。下流のバルブでの初期流量 $Q_0=2.0\text{L/s}$ で、レイノルズ数は11,160であった。音速 $a=1,300\text{m/s}$ 、定常管摩擦係数 $f=0.0302$ とした。

漏れが管路中で一箇所の場合を考える。漏れの位置、圧力測定場所及び測定箇所などによる影響を調べるために漏れの位置 x^*_L を0.25、0.5、0.75と変化させ、圧力測定位置 x^*_{mea} は0.2、

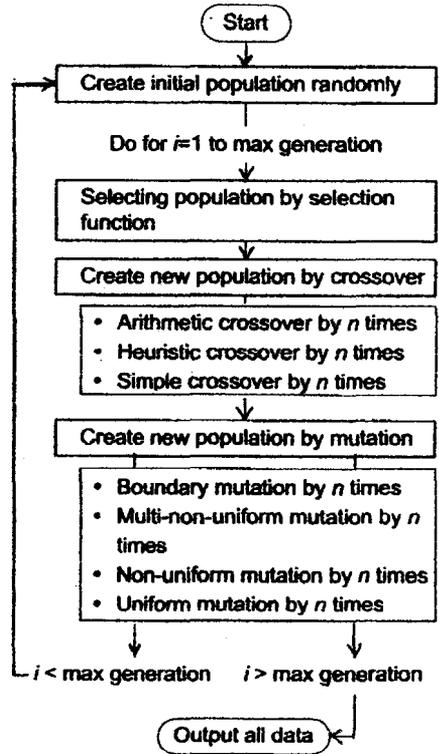


Fig. 3 GA flow chart

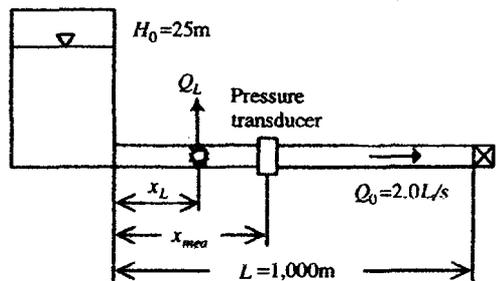


Fig. 4 Pipeline connecting an upstream reservoir and downstream valve

0.4、0.6、0.8とした。圧力測定位置が一箇所と二箇所の場合を比較した。GAの染色体は、漏れの位置 x^*_L 、漏れの大きさ $C_d A_L / A$ 、管摩擦係数 f で構成した。ここで、漏れの位置は $0 \leq x^*_L \leq 1$ とし、管路全体を探索できるようにした。漏れの大きさは $0 \leq C_d A_L / A \leq 0.1$ とし、管の直径の10%までの漏れが検索できるように

した。また、管摩擦係数は $0 \leq f \leq 0.1$ とした。境界条件である上流の圧力 H_0 と下流の流量 Q_0 は既知とする。この場合、管路中間で圧力を測定すれば管路の管摩擦係数を把握できる。しかし、漏れが管路中に存在するかどうかは確定できない場合には管摩擦係数もGAのパラメータにして探索せざるをえない。

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のあるパラメータでの計算から求めた圧力値 H^c の二乗差を利用した。

$$E = \sum_{i=1}^{end} (H_i^m - H_i^c)^2 \quad \dots(14)$$

7. 結果および考察

7-1 漏れの位置による影響

管路中の漏れが一箇所、圧力測定も一箇所で行ったときの結果について検討した。実際の漏れの位置 x^*_L を0.25、0.5、0.75に変化させ、圧力測定点を0.2、0.4、0.6、0.8と変化させた時の漏れの探索結果を比較した。GA計算では、初期世代をランダムに選び、その後の突然変異、交叉、選択もランダムに選択するので、いつも同じ探索結果になるとは限らない。そこで、各条件での探索傾向を調べるために、初期集団数は200、最大世代数は100、突然変異は世代ごとに4回、交叉も4回の条件で、簡単な計算を行った。GAパラメータは漏れの位置、大きさ、管摩擦係数である。この時、dell-8400 (Pentium 4 CPU、3.4GHz、2G RAM)での計算時間は約26.8秒であった。計算の結果、各条件での計算を100回したときに三つのパラメータの一つである漏れの位置を真の解から5%以内の精度で探索できる平均確率は、Table 1のように、72.5% ($x^*_L=0.5$)から95.5% ($x^*_L=0.25$)までの差が出た。同一の圧力測定位置($x^*_{mea}=0.8$)に対して、実際の漏れの位置を0.25と0.5にし、他のGAパラメータである漏れの大きさ

Table 1 Percents of detecting leak location less than 5% difference ; $C_d A_L / A = 0.001$, $f = 0.0302$

$x^*_{mea} \backslash x^*_L$	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

と管摩擦係数は同一の場合の最適化過程の一例をFig. 5に示す。

同図(1)は実際の漏れの位置が0.25、漏れの大きさは0.001、管摩擦係数は0.0302で、圧力測定点が0.8のときの適合度および探索されたGAパラメータである。同図(2)は、圧力測定点は同一で、実際の漏れの位置が0.5、他のパラメータは同一のときの探索結果である。適合度はいずれの場合も繰り返し数とともに改善されている。しかし、 $x^*_L=0.25$ の場合には漏れの位置及び他のパラメータが正しく探索されているのに対して、 $x^*_L=0.5$ の場合には実際の漏れの位置、漏れの大きさ、管摩擦係数が正しく探索されていない。すなわち、 $x^*_L=0.5$ の場合は真の解の代わりに局所解に収束している。真の解が $x^*_L=0.5$ 、 $C_d A_L / A = 0.001$ 、 $f = 0.0302$ であるのに対し、計算で検出したパラメータは $x^*_L = 0.925$ 、 $C_d A_L / A = 0.0005$ 、 $f = 0.0558$ であった。Fig. 6は真の解である測定圧力 H^m と計算圧力 H^c を比較したものである。GAのパラメータである漏れの位置、大きさ、管摩擦係数は異なるが、それで計算した圧力はほとんど測定圧力と一致した。実際の漏れが0.5にある場合には、圧力をどこで測定してもこのような局所解を検出する傾向があるので、漏れが0.25と0.75にあるときより検索精度が低下することが確認できる。これは、突然変異がうまく機能していないためと考えられ、今後の課題である。

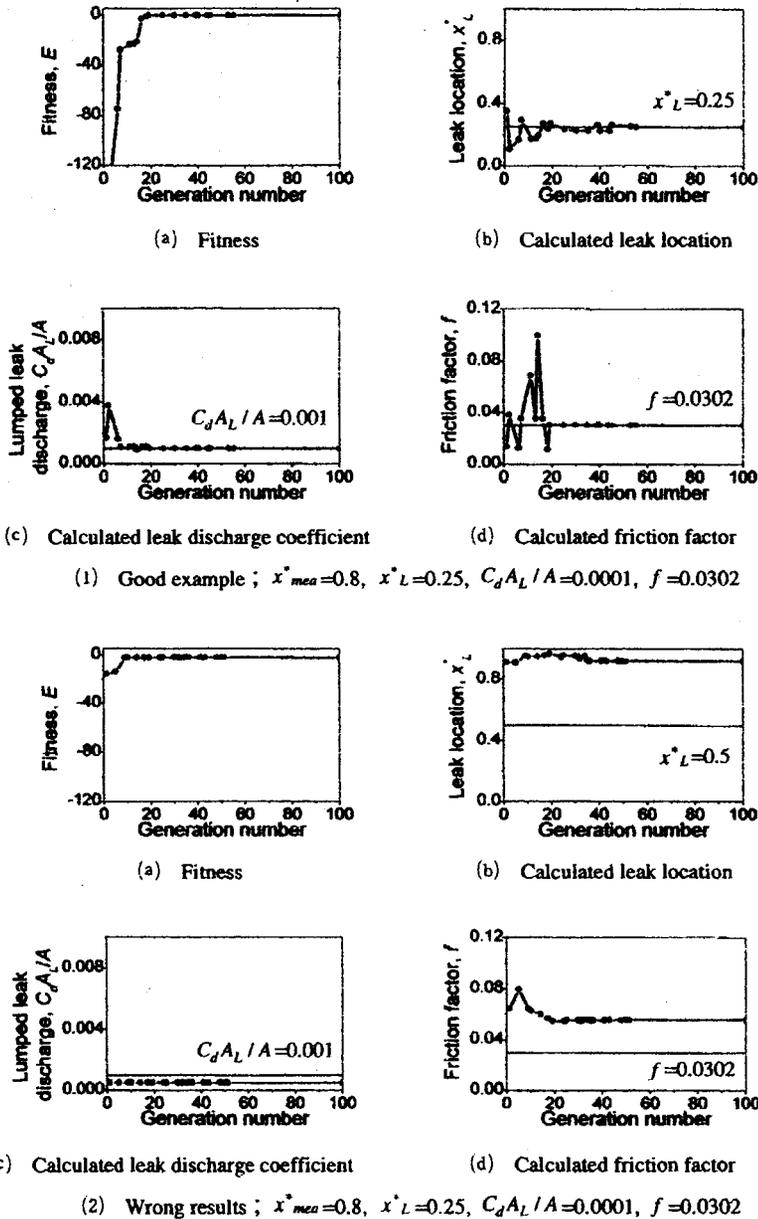


Fig. 5 Leak detecting processes

7-2 GAパラメータ数による影響

Fig. 4のようなシステムで、正確な管摩擦係数が既知の場合は、定常圧力を測定することで漏れの有無の判断は出来る。 H_0 と Q_0 が与えられると次の式から測定点での圧力が計算できる。

$$H_{mea} = H_0 - \frac{x_{mea} \cdot f}{2gDA^2} Q_0 |Q_0| \quad \dots(15)$$

この式で計算した圧力と測定圧力の間に差があるときは上流側と測定点の間に漏れが存在すると判断できる。しかし、正確な管摩擦係数が把握できない場合、あるいは、既知とした管摩

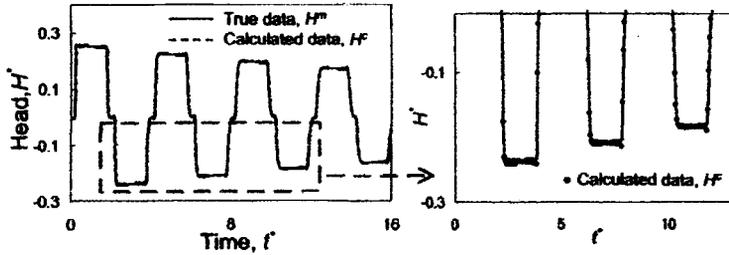
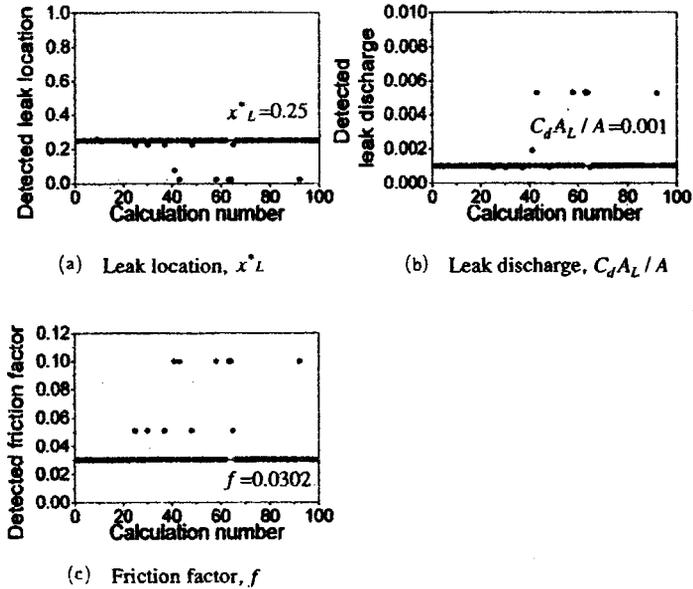
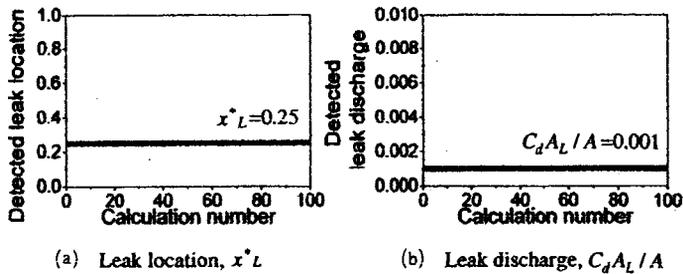


Fig. 6 Time histories of head for true data ($x^*L=0.5$, $C_dA_L/A=0.001$, $f=0.0302$, $x^*_{mea}=0.8$) and calculated data ($x^*L=0.925$, $C_dA_L/A=0.0005$, $f=0.0558$, $x^*_{mea}=0.8$)



(1) Case of three GA parameters ; x^*L , C_dA_L/A , f



(2) Case of two GA parameters ; x^*L , C_dA_L/A

Fig. 7 Results of detecting leak with 3 and 2 parameters ($x^*L=0.25$, $C_dA_L/A=0.001$, $f=0.0302$, $x^*_{mea}=0.2$)

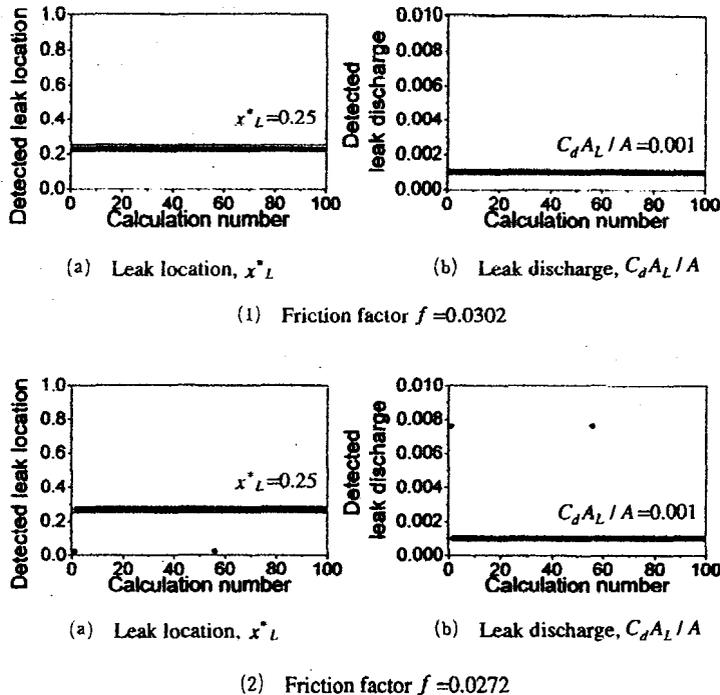


Fig. 8 Results of detecting leak with 3 and 2 parameters ($x^*_L=0.25$, $C_d A_L / A=0.001$, $f=0.0302$, $x^*_{mea}=0.2$)

擦係数が実際の管摩擦係数と異なる場合には漏れの判断が出来なくなる。非定常逆解法を利用する場合には管摩擦係数が未知であっても、 f をGAパラメータとして探索できる。管摩擦係数が既知の場合はGAパラメータを漏れの位置と大きさの二つにして探索する。Fig. 7は、パラメータに管摩擦係数を加え、3パラメータの場合と漏れの位置と大きさのみの2パラメータの場合の探索結果を示したものである。2パラメータの場合には100回の計算で全部真の解に収束したが、3パラメータの場合には局所解に収束する傾向を示している。漏れの位置が0.25、圧力測定点が0.2のとき、3パラメータの場合には94%の確率で漏れの位置を5%以内の精度で探索できた。漏れの位置をさらに0.25、0.5、0.75にし、圧力測定点を0.2、0.4、0.6、0.8にした場合、平均的には、2パラメータのとき、87.7%、3パラメータでは85.5%の確率で実際

の漏れの位置を5%以内の精度で探索できた。

管摩擦係数として、実際の係数 f に対して±10%の誤差のある値($f=0.0332$ 、 0.0272)を与えて二つのパラメータを探索した結果がFig. 8である。管摩擦係数が真の値より10%大きい場合($f=0.0332$)は漏れの位置は真の解より10%小さい0.225に収束するが、漏れの大きさは真の値と一致している。一方、真の値から10%小さい場合($f=0.0272$)にも漏れの位置は真の解より10%大きい0.275に収束し、漏れの大きさは真の解に収束している。漏れの位置と管摩擦係数は線形関係にあるから、非定常逆解法では管摩擦係数が多少真の値と違っても、その差の分だけ漏れの位置に影響するものの、漏れの大きさには影響しないことが確認できた。

7-3 圧力測定位置による影響

圧力の測定位置を2箇所にした場合の目的関数として、2点の測定圧力値($H1^m$ 、 $H2^m$)と

Table 2 Percents of detecting leak location less than 5% difference using two points' pressure data; $C_d A_L / A = 0.001$, $f = 0.0302$

x_{mea}^* \ x^*_L	0.25	0.5	0.75	Mean
0.2/0.4	99	74	100	91.0
0.2/0.6	96	76	100	90.7
0.2/0.8	97	77	100	91.3
0.4/0.6	99	72	100	90.3
0.4/0.8	94	69	91	84.7
0.6/0.8	97	73	96	88.7
Mean	97.0	73.5	97.8	89.4

GA計算により求められた圧力値 ($H1^c$, $H2^c$) の差をとり、各接点での差の二乗の和とした。このとき、 $H1$ と $H2$ は同一の圧力の項目なので加重係数を与えずにそのまま利用した。

$$E = \sum_{i=1}^{end} \{ (H1_i^m - H1_i^c)^2 + (H2_i^m - H2_i^c)^2 \} \quad \dots(16)$$

Table 2 に 2 点の圧力測定データを利用した場合の探索結果を示す。実際の漏れの位置を 5% 以内の精度で探せる平均確率は、1 箇所の測定圧力を利用した場合の 87.7% から 89.4% までと、約 1.9% 改善できた。計算に要した時間は 1 箇所の場合より 5.5% 余計にかかった。簡単な形状のシステムであるので精度は大きくは上がらなかったものの、形状が複雑な場合や管摩擦係数が管路中で変化する場合には 2 点での測定圧力を利用するのが良いと考えられる。

8. 結論

非定常流れ解析とGAを利用した最適化によって管路での漏れの探索を行った。その結果、次のような結論を得た。

- ① 簡単な管路システムにおいて、漏れの位置と漏れの大きさ、および管路の管摩擦係数をGAと非定常逆解法で求めることが可

能である。

- ② 漏れが 1 箇所の場合には、管摩擦係数をパラメータに加えて探索した結果と管摩擦係数をパラメータから除いた結果には大きな差はなかった。
- ③ 実際の値から多少誤差がある管摩擦係数を利用して探索しても漏れの大きさは影響なく検出できる。
- ④ 漏れの位置と圧力測定位置によって、探索結果の収束の様相が変わる。
- ⑤ 二箇所の圧力データを利用することによって一箇所の圧力データを利用するより探索の精度が上がる。

<参考文献>

- (1) Pudar, R. S., and Liggett, J. A., Leaks in pipe networks, J. Hydraulic engineering, Vol.118, No.7 (1992), 1031-1046
- (2) Liggett, J. A., and Chen, L.-C., Inverse transient analysis in pipe networks, J. Hydraulic engineering, Vol.120, No.8 (1994), 934-955
- (3) 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 (2001), 262-265
- (4) Kim, S.H., Extensive development of leak detection algorithm by impulse response method, J. Hydraulic engineering, Vol.131, No.3 (2005), 201-208
- (5) Wylie, E. B., and Streeter, V. L., Fluid transient in systems, (1993), 203-204, Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- (6) Simpson A. R., Vitkovsky, J., Development in unsteady pipe flow friction modelling, J. Hydraulic research, Vol.39, No.3 (2001), 249-257
- (7) The Genetic Algorithm Optimization Toolbox (GAOT) for Matlab 5. Jun 1998. NC state university. 23 Oct. 2006 <http://www.ise.ncsu.edu/mirage/GAToolBox/gaot/>
- (8) Michalewicz, Z., Genetic Algorithms+Data Structures= Evolution Programs (1994), AI Series. Springer-Verlag, New York