

遺傳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に関する研究

平成19年12月

九州工業大学大学院生命体工学研究科

金 永 峻

目次

記号	10
第1章 序論	13
1.1 研究の背景	13
1.2 既往の研究	16
1.3 本研究の目的及び意義	20
1.4 論文の概要	22
第2章 非定常流れの解析	24
2.1 基礎方程式	24
2.2 特性曲線法による解析	31
2.3 非定常管摩擦抵抗	36
2.4 非定常流れ解析の適用	41
2.5 漏れ管の非定常流れ解析	45
2.5.1 漏れの処理	45
2.5.2 漏れ管の初期値計算	49
第3章 非定常逆解法	54

		3
3.1	非定常逆解法	54
3.2	遺伝的アルゴリズム	57
3.2.1	パラメータの表現法	57
3.2.2	選択の方法	59
3.2.3	遺伝的オペレーター	60
第4章	管路における漏れの探索例	64
4.1	漏れが1箇所の場合	64
4.1.1	供試管路	64
4.1.2	漏れの位置による影響	66
4.1.3	GAパラメータ数による影響	74
4.1.4	圧力測定位置による影響	81
4.2	漏れが2箇所の場合	83
4.2.1	供試管路	83
4.2.2	漏れの探索結果	84
4.2.3	ノイズの含まれた測定圧力の影響	87
4.3	漏れ数が仮定と異なる場合	93
第5章	結論	98
5.1	本研究で得られた結果	98
5.2	問題点と将来への展望	100

	4
謝辞	102
参考文献	103
付録	113
A.1 軟らかい管を含む管路の過渡現象	114
A.1.1 実験装置	114
A.1.2 実験方法	116
A.1.3 非定常流れ解析	118
A.1.4 軟らかい管の長さによる影響	126
A.1.5 軟らかい管の挿入位置による影響	128
A.1.5 ベローズ管の形状による影響	130
A.2 定常逆解法	133

表 目 次

4.1	Percents of detecting leak location less than 5 % difference; $C_d A_L/A = 0.001$ 、 $f = 0.0302$	67
4.2	Percents of detecting leak location less than 5 % difference with 2 pressures; $C_d A_L/A = 0.001$ 、 $f = 0.0302$	82
4.3	The leak conditions; $x_{mea}^* = 0.2$ 、0.4、0.6、0.8	83
4.4	The results of leak detection with pressure data of standard deviations; $(x_L^*)_1 = 0.3$ 、 $(x_L^*)_2 = 0.7$ 、 $(C_d A_L/A)_1 = 0.0004$ 、 $(C_d A_L/A)_2 = 0.0006$ 、 $x_{mea}^* = 0.4$	93
4.5	The leak conditions; $x_{mea}^* = 0.2$ 、0.4、0.6、0.8	94
4.6	Percents of detecting leak location less than 5 % difference; under assumption of 2 leak points	95
4.7	Percents of detecting leak location less than 5 % difference; under assumption of 1 leak point	95
A.1	Specifications of main pipe and flexible tube	117
A.2	Wave speeds for flow rate and steady pressure	132

目 次

2.1	Diagram for equation of motion	25
2.2	Diagram for equation of continuity	26
2.3	The $x-t$ grid for solving transient flow	34
2.4	Diagram for transient flow	39
2.5	Schematic of test pipe system; $x_{ins} = 82\text{ m}$, $x_{mea} = 85\text{ m}$, $L = 86\text{ m}$	42
2.6	Comparison of pressure calculated by elastic and viscoelastic model; $Q_0 = 10.28\text{ l/min}$, $H_0 = 20.4\text{ m}$, $x_{mea} = 85\text{ m}$, $L = 86\text{ m}$	42
2.7	Calculated and measured pressure with 1 m -length flexible tube inserted at downstream; $Q_0 = 15.62\text{ l/min}$, $H_0 = 20.4\text{ m}$, $x_{ins} = 82\text{ m}$, $x_{mea} = 85\text{ m}$, $L = 86\text{ m}$	44
2.8	Calculated and measured pressure with 2 m -length flexible tube inserted at downstream; $Q_0 = 15.62\text{ l/min}$, $H_0 = 20.4\text{ m}$, $x_{ins} = 82\text{ m}$, $x_{mea} = 85\text{ m}$, $L = 86\text{ m}$	44
2.9	Nodes with leak	46
2.10	Leak in pipe	50
2.11	Two leaks in pipe	51
3.1	Flow chart of inverse transient method	56
3.2	GA flow chart	58

4.1	Pipeline connecting upstream reservoir and downstream valve with 1 leak; $L = 1000\text{ m}$, $H_0 = 25\text{ m}$, $Q_0 = 2.0\text{ l/s}$, $a = 1,300\text{ m}$, $f = 0.0302$	65
4.2	Leak detection process of good example (1); $x_L^* = 0.25$, $x_{mea}^* = 0.8$, $C_d A_L/A = 0.001$, $f = 0.0302$	69
4.2	Leak detection process of good example (2); $x_L^* = 0.25$, $x_{mea}^* = 0.8$, $C_d A_L/A = 0.001$, $f = 0.0302$	70
4.3	Leak detection process of wrong example (1); $x_L^* = 0.5$, $x_{mea}^* = 0.8$, $C_d A_L/A = 0.001$, $f = 0.0302$	71
4.3	Leak detection process of wrong example (2); $x_L^* = 0.5$, $x_{mea}^* = 0.8$, $C_d A_L/A = 0.001$, $f = 0.0302$	72
4.4	Time histories of static head at x_{mea}^* for measured data ($x_L^* = 0.5$, $C_d A_L/A = 0.001$, $f = 0.0302$) and calculated data ($x_L^* = 0.925$, $C_d A_L/A = 0.0005$, $f = 0.0558$); $x_{mea}^* = 0.8$	73
4.5	Results of detecting leak with 3 parameters (x_L^* , $C_d A_L/A$, f); $x_L^* = 0.25$, $C_d A_L/A = 0.001$, $f = 0.0302$, $x_{mea}^* = 0.2$	77
4.6	Results of detecting leak with 2 parameters (x_L^* , $C_d A_L/A$); $x_L^* = 0.25$, $C_d A_L/A = 0.001$, $f = 0.0302$, $x_{mea}^* = 0.2$	78
4.7	Results of detecting leak with 10 % larger friction factor ($f = 0.0332$); $x_L^* = 0.25$, $C_d A_L/A = 0.001$, $f = 0.0302$, $x_{mea}^* = 0.2$	79
4.8	Results of detecting leak with 10 % smaller friction factor ($f = 0.0272$); $x_L^* = 0.25$, $C_d A_L/A = 0.001$, $f = 0.0302$, $x_{mea}^* = 0.2$	80
4.9	Pipeline connecting an upstream reservoir and downstream valve with 2 leaks; $L = 1,000\text{ m}$, $H_0 = 25\text{ m}$, $Q_0 = 2.0\text{ l/s}$	84
4.10	Results of leak detection with 2 leaks; $x_{mea}^* = 0.8$	85
4.10	Results of leak detection with 2 leaks; $x_{mea}^* = 0.8$	86

4.11	Pressure histories without and with noises; $x_{mea}^* = 0.8$	88
4.11	Pressure histories without and with noises; $x_{mea}^* = 0.8$	89
4.12	Detected leak locations with noisy data of 0.125 m standard deviation; $(x_L^*)_1 = 0.3$ 、 $(x_L^*)_2 = 0.7$ 、 $(C_d A_L/A)_1 = 0.0004$ 、 $(C_d A_L/A)_2 = 0.0006$ 、 $x_{mea}^* = 0.4$	90
4.13	Detected leak locations with noisy data of 0.25 m standard deviation; $(x_L^*)_1 = 0.3$ 、 $(x_L^*)_2 = 0.7$ 、 $(C_d A_L/A)_1 = 0.0004$ 、 $(C_d A_L/A)_2 = 0.0006$ 、 $x_{mea}^* = 0.4$	91
4.14	Detected leak locations with noisy data of 0.5 m standard deviation; $(x_L^*)_1 = 0.3$ 、 $(x_L^*)_2 = 0.7$ 、 $(C_d A_L/A)_1 = 0.0004$ 、 $(C_d A_L/A)_2 = 0.0006$ 、 $x_{mea}^* = 0.4$	92
4.15	Process of leak detection under assumption of 2 leak points for 1 leak point; $x_L^* = 0.75$ 、 $C_d A_L/A = 0.001$ 、 $x_{mea}^* = 0.6$	96
4.15	Process of leak detection under assumption of 2 leak points for 1 leak point; $x_L^* = 0.75$ 、 $C_d A_L/A = 0.001$ 、 $x_{mea}^* = 0.6$	97
A.1	Experimental apparatus	115
A.2	Kelvin-Voigt viscoelastic model	119
A.3	Strain curve as time	120
A.4	Deformation of bellows pipe	124
A.5	Time histories of pressure with 1 and 2 m length flexible tube inserted at down	127
A.6	Time histories of pressure with 1 and 2 m length flexible tube inserted at middle of pipeline	127
A.7	Calculated maximum pressure as length of flexible tube	128
A.8	Time histories of pressure with 1 m length flexible tube	129
A.9	Time histories of pressure with 2 m length flexible tube	129

A.10 The maximum pressure with 1 and 2 <i>m</i> length flexible tube	130
A.11 Measured pressure fluctuations for various flow rates	131
A.12 Wave speed for various steady pressures	132
A.13 Simple pipeline system for inverse steady-state method	134

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^*	:	Vardy のせん断減衰係数
C_d	:	漏れ部のオリフィス係数
D	:	管内径 (m)
E	:	ヤング率 (Pa)
E_0	:	瞬間弾性係数 (Pa)
E_1	:	遅延弾性係数 (Pa)
E_v	:	適応度
f	:	Darcy-Weisbach の管摩擦係数
f_s	:	定常管摩擦係数
f_u	:	非定常管摩擦係数
g	:	重力の加速度 (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)
K	: 体積弾性係数 (Pa)
k	: Brunone の摩擦係数
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
p	: 圧力 (Pa)
Q	: 流量 (m^3/s)
Q_0	: 下流の初期流量 (m^3/s)
Q_L	: 漏れ部での漏れ流量 (m^3/s)
q	: GA 最大期待値
r	: 管の半径 (mm)
r_k	: 個体 x_k のランキング
r_1, r_2	: $0 \sim 1$ の一様乱数
Re	: Reynolds 数
s	: 管の厚さ (mm)
t	: 時間 (sec)
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_{ins} : 軟らかい管が挿入された位置 (m)
- x_{mea} : 圧力の測定位置 (m)
- x_k : GA の k 番目の個体
- Δx : 節点間の距離 (m)
- γ : 水の単位重量 (N/m^3)
- ε : 変形率
- ε^i : 瞬間変形率
- ε^r : 遅延変形率
- η_1 : 遅延減衰係数
- μ : 粘性係数 ($Pa \cdot s$)
- Π_1, Π_2 : 親個体
- π_1, π_2 : 子個体
- ρ : 水の密度 (kg/m^3)
- σ : 応力 (Pa)
- τ : せん断応力 (Pa)
- * : 無次元量

第1章 序論

1.1 研究の背景

管路は様々な種類の流体を輸送する主な手段であり、その重要性は高い [1,2]。欧州連合 (EU) には、原油及び精製油を輸送する管路がおよそ 3 万 1 千 *km*、高圧ガス輸送管路が 18 万 *km* 以上、低圧給水管が 100 万 *km*、そして 1 万 *km* の有毒化学ガス輸送管路が使われている [3,4]。このように広範囲の輸送手段として使われている管路において、必要な流体量を安定供給するためには、漏れの防止が必須である。先進国だけではなく、高度な経済成長を果たしている中国などでは、西から東へ、また、南から北への天然ガス輸送管路が設置されている。このような長距離の管路では漏れが重要な問題になる [5]。

石油や天然ガスの輸送ばかりでなく、飲用水の漏れも様々な問題を引き起こす。多くの給水システムにおいて、かなりの飲用水が漏れによって給水管路から失われているのが現状である。1991 年に行われた IWSA (International Water Supply Association) の調査によれば、およそ 20 ~ 30 % の用水が失われている [6]。また、ある給水管路では、生産された用水の 50% が漏れによってなくなると報告されている [7]。OECD 加入国で

ある韓国でも、山岳地域の自治体では53.8%の生産された飲用水が漏れによって失われてしまったと報告されている [8]。

漏れによって失われた用水には、原水の費用、それを浄水する経費、輸送経費などが含まれている。さらに、漏れる量を補うために、浄水施設、管路、ポンプなどの大型化が必要となり、漏れによる経済的な損失は大きい。

一方、地球上には約14億 km^3 の水が存在するが、その97.5%は海水が占め、利用可能な水は全体のわずか0.01%である。それに人口増加も伴い、深刻な水不足に直面する可能性があるという国連は報告している [9]。このように、経済的な損失だけではなく、水資源は限られた貴重な自然資源であるので、大切に利用しなければならない。

さらに、漏れは道路や建物など管路周りの構造物に深刻な影響を与える可能性があり、安全上の問題が出てくる。また、飲用水の管路における漏れは、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、漏れに伴う危険度は高くなる。たとえば、1998年にロシアで発生した液体天然ガス漏れの事件では、およそ700人の死者が出る大惨事となった [10]。

これらの理由で、管路における漏れの検出は重要な問題として扱われ、様々な漏れの検出方法が開発されている [11]。しかし、信頼できるとされている方法(地中探知レーダー法、音響漏れ診断法、赤外分光法など)は非常に高価であることが問題である。また、これらの方法は、探索を

行うオペレーターの経験、漏れの大きさ及び管路系の特性などに依存し、かなりの専門知識を必要とする [12]。それゆえ、単純、かつ信頼できる漏れの探索方法の確立が望まれている [13]。

1.2 既往の研究

管路中の漏れを探索する方法として様々な方法が開発されており、探索の対象や環境などによって適切な方法が選択される。一つの探索方法を利用して、すべての条件や環境に対応するのは難しい。それ故、複数の方法を併用する必要がある場合も多い。漏れの探索方法に要求される基本的な事項としては、迅速、かつ、安価で、流体供給の長時間にわたる中断の回避である。このような要求を満足させるためには、定常値を測定するより非定常値を測定して利用した方が良いと Ferrante らは述べている [14]。これは、非定常測定値を利用する探索方法が、定常値を利用する方法より管路上の情報を把握しやすいからである。非定常値を利用する場合には、時間領域あるいは周波数領域で探索を行う。定常値を利用するより多様な解析ができて、より良い探索が可能になる。

流体輸送管路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。往復する圧力波には、管路の状態に関する情報が含まれている。この圧力波は漏れによって減衰され、非定常圧力波から漏れの重要な情報を得ることが可能にある。このような非定常圧力波を測定及び分析することで漏れの大きさと位置を探する方法がいくつかある。

Nicholas [15] は、システムの区間に対して、流量バランス (flow balance)、蓄積率 (packing rate)、及び、流量バランスと蓄積率の差である均衡率 (balance rate) を導入することによって、全体の流量の 0.5 ~ 2 % の漏れを探

索できると報告している。Liou ら [16] は、管路末端で非定常圧力及び流量を測定して、計算で求めた値との差を比較することで漏れを探索した。

非定常流れを周波数領域 (frequency domain) で解析することで漏れの探索を行った例もある。Jösön ら [17] は、管路システムの非定常圧力の反射挙動を漏れの探索に利用した。漏れによって発生する非定常圧力波の反射波を、圧力の時系列変動スペクトル解析で求めた。Lee ら [18] は、管路中のバルブに一定のパターンの振動を与え、測定された圧力の周波数応答とモデル化された周波数応答を比較する方法 (inverse resonance method)、及び、周波数応答ダイアグラムでのピークの大きさを相対比較する方法 (peak-sequencing method) を利用して漏れの探索を行った。Mpesha ら [19] は、伝達マトリックス法を利用して数種類の管路システムの漏れの探索を行った。管路中のバルブを周期的に開閉することで定常振動流れを発生させ、伝達マトリックス法で周波数領域解析を行った。この方法は、管路中の一箇所での圧力や流量の変動から漏れを探索する方法で、様々な流体を輸送するシステムの漏れを実時間で探索できるとしている。Wang ら [20] は、漏れが非定常流れの圧力を緩和する効果を利用して漏れの探索を行った。一般的に、非定常圧力波を緩和するのは管の摩擦抵抗や漏れで、緩和された圧力波のフーリエ成分は緩和がない場合のフーリエ成分と異なる。そこで、彼らは、圧力波のフーリエ分析によって漏れの位置や大きさを計算した。この方法によって、管路断面積の 0.1 % までの漏れ面積を持つ漏れを探索できると報告している。

Pudar ら [13] は、定常状態の給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、節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求める方法である。しかし、定常の圧力を利用したこの計算では、正確な管摩擦係数を必要とする。

Liggett ら [21] 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 [22] と Nash ら [23] は、この問題の最適解を遺伝的アルゴリズム (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節点の流出量を GA のパラメータとした。疑わしい節点の数が増加するとき、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。Kapelan [24] は、Pudar ら及び Liggett らが扱った問題と同一の問題を GA と LM 法を組み合わせたハイブリッド非定常逆解法で最適化した。GA は全体的に解を、そして LM 法は局所的に解を探索するのに効果的であることを利用している。このハイブリッド GA 法は LM 法より安定で、GA 法より正確かつ計算時間が短いことを示した。Kim [25] は、インパルス応答法 (Impulse response method) 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て探索した。

給水網での漏れを探索した例 [13,21–24] では、7 個の節点とそれを結ぶ 11 本の管路で構成された給水網を対象としている。この時、漏れは節点だけで発生すると考えられている。様々な管路特性(材質、内径)を持った複雑な給水網での漏れを、節点での流出量として探索している。しかし、節点間の間隔が長くなる場合には、漏れの正確な位置を探索することが難しくなる。

非定常流れ解析を利用した漏れの探索方法は、従来の音響機器を利用して漏れから発生する音や振動を探索する方法に比べて、新しい方法であり、まだ実際に現場で使われず研究やフィールドテストの段階に留まっている [26]。それ故、非定常流れの特性や測定圧力位置などが探索に及ぼす影響に関する検討は行われていない。実用化するためには、探索方法の限定条件を明らかにして、探索可能な対象と探索の特徴を明確にする必要がある。

1.3 本研究の目的及び意義

管路中で発生する漏れは、経済、公衆衛生、安全など様々な面で有害であり、防止しなければならない。このような漏れを防止するためには、流体を低圧力で輸送するなどの運営的な面の努力も必要であるが、迅速に漏れの有無を判断し、漏れの位置や大きさを探し出すことも重要である。

従来の音響を利用する漏れの探索方法には、高価な探索装置が必要で、専門知識や経験を有する熟練者が探索を行う必要がある。さらに、周りの騒音や振動による影響も大きく、都心部の道路付近の管路では、漏れの探索が困難である。そこで、管路中の漏れを簡単かつ正確に探索する方法として非定常逆解法を提案し、その漏れ探索法の問題点を明らかにすることを本研究の目的とする。

管路中で発生された非定常流れには、管路内の情報が含まれている。レーダシステムのように、非定常流れが定常状態に安定するまでに、圧力波は、管路系内を往復する間、漏れなどの特異要素に遭遇すると反射波を出す。本研究では、この反射波が非定常流れに及ぼす影響を利用して漏れの探索を行う。管路系で行われるバルブの操作、ポンプの起動及び停止などによって非定常流れは頻繁に発生するので、管路の一部の地点で測定した圧力を計算で求められる圧力変動値と比較しつつ、遺伝的アルゴリズムによる最適化を行うことで漏れを探ることができる。

非定常逆解法を利用するために、まず非定常流れの精度の高い解析が必要となる。本研究では、非定常流れ解析のために、非定常管摩擦抵抗

や粘弾性効果を含めた計算を行い、汎用性のある解析法を確立した。

給水管路系を対象とした逆解法を利用する漏れの探索方法では、特定した節点だけの漏れを探索する。本研究で提案する方法では、あらかじめ漏れの箇所を仮定するものの、非定常流れ解析結果との比較により、順次、仮定を修正することで、管路系全体での漏れを探索することができる。さらに、非定常逆解法を利用して漏れを探索する方法に及ぼす影響因子を明らかにすることで、これらを考慮した実用的な探索ができるようにした。

本研究では、数値処理プログラム (MATLAB[®]) を利用して、非定常流れ計算と遺伝的アルゴリズムの最適化を同時に行い、迅速な計算ができるようにした。非定常逆解法では、遺伝的アルゴリズムで求めた解の適応度を非定常流れ計算で求めるため、互いを同一のプログラム上で処理することによって効率良い連結ができると考えられる。

1.4 論文の概要

本研究は、遺伝的アルゴリズムを最適化手法とする非定常逆解法を用いて管路の漏れを探索する方法に関するものである。非定常逆解法は、非定常流れの解析と、遺伝的アルゴリズムによる最適化の併用によって、漏れに関する情報を検出する方法である。本論文は、以下の内容で構成されている。

第2章では、最初に、非定常流れの解析方法について述べる。解析に必要な基礎方程式、特性曲線法による離散化方法を説明する。そして、非定常管摩擦抵抗を考慮した非定常流れの計算過程を記述する。続いて、非定常流れ解析の適用例を示す。軟らかい管が非定常流れに及ぼす影響を計算で求め、実験結果と比較することで、本研究の非定常流れ解析の妥当性を確認する。さらに、漏れ管の非定常流れ解析について述べる。

第3章では、漏れの探索のために用いられた非定常逆解法について述べる。非定常逆解法の手順が示され、非定常逆解法の最適化手段として利用された遺伝的アルゴリズムに関して記述する。本研究のGAで採用されたパラメータの表現法、選択方法、交叉、突然変異について説明する。

第4章では、前章の非定常逆解法を用いて管路における漏れを探索した例を示す。まず、漏れが1箇所が存在する場合の漏れの探索結果を示す。漏れの位置が探索に及ぼす影響、GAパラメータ数による影響、圧力測定位置が漏れの探索に及ぼす影響について述べる。続いて、漏れが2箇所に存在する場合の探索結果を示す。測定圧力にノイズが含まれた場合

の結果を示し、漏れの数が仮定した漏れ数と異なる場合の探索結果について説明する。

第5章では、以上の研究を総括し、得られた結果を要約し、残された問題点や将来の展望について述べる。

第2章 非定常流れの解析

定常流れ (steady flow) は、ある点における物理量が時間に対して変化しない流れである。一方、非定常流れ (unsteady flow) は、時間と共にある点の物理量も変化する流れである。定常流れは、非定常流れの方程式を満足する非定常流れの特別なケースの一つである。水撃 (water hammer、ウォーター・ハンマー) や過渡流れ (transient flow) は管路での非定常流れである [27]。

2.1 基礎方程式

図 (2.1) は断面積 A 、内径 D の円形断面を持つ管路内での流れを示す。ここで、管路は平行で、管の垂直高さは変わらないと仮定する。

長さ δx の流体要素に対する 1 次元の運動方程式は次のようになる [28]。

$$pA - \left\{ pA + \frac{\partial(pA)}{\partial x} \delta x \right\} - \tau \pi D \delta x = \rho A \delta x \frac{dV}{dt} \quad (2.1)$$

ここで、 p : 圧力、 x : 管軸方向の長さ、 t : 時間、である。断面積 A の変化がない場合には、式 (2.1) は次のようになる。

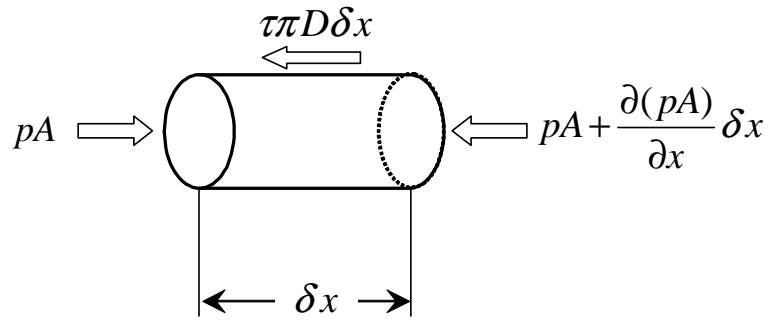


Fig. 2.1: Diagram for equation of motion

$$-\frac{A \partial p}{\partial x} - \tau \pi D = \rho A \frac{dV}{dt} \quad (2.2)$$

ここで、せん断応力 τ は Darcy-Weisbach の式 [29] により、管摩擦係数 f を用いて、

$$\tau = \frac{\rho f V |V|}{8} \quad (2.3)$$

と表される。式 (2.3) を式 (2.2) に代入し、整理すると

$$\rho \frac{dV}{dt} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f V |V|}{8A} \pi D = 0 \quad (2.4)$$

となり、管の断面積 A と内径 D の関係から、結局、

$$\frac{dV}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{f V |V|}{2D} = 0 \quad (2.5)$$

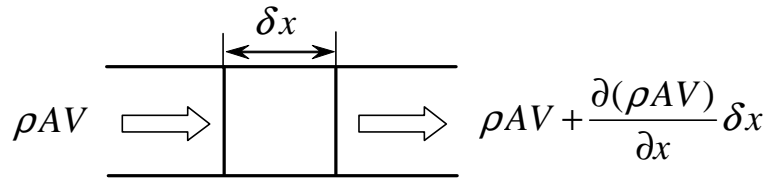


Fig. 2.2: Diagram for equation of continuity

となる。

図(2.2)のように、断面積 A 、長さ δx の検査空間を考え、この検査空間を通過する流体の密度を ρ 、平均流速を V とする。 dt 間に上流の断面から流入する流体の質量を $\rho AV dt$ とすれば、下流の断面から流出する流体の質量は $\rho AV dt + \frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} \delta x dt$ となる。この時、検査空間に流入する質量の差は

$$\rho AV dt - \left\{ \rho AV + \frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} \delta x \right\} dt \quad (2.6)$$

となる [28]。この差によって要素内の流体の質量に変化を生ずる。 dt 間の質量の変化を $\frac{\partial(\rho A \delta x)}{\partial t} dt$ とすれば、質量保存則により、

$$\frac{\partial(\rho A \delta x)}{\partial t} dt + \frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} \delta x dt = 0 \quad (2.7)$$

すなわち、

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho AV)}{\partial x} = 0 \quad (2.8)$$

が得られる。

今、式(2.8)を次のように分解する。

$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} + V \frac{\partial(\rho A)}{\partial x} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.9)$$

式(2.9)を全微分 d/dt を用いて書き直せば、

$$\frac{d(\rho A)}{dt} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.10)$$

となる。ここで、 $d/dt \equiv \partial/\partial t + V\partial/\partial x$ である。この全微分要素 $d(\rho A)/dt$ を2つに分けて整理すると、

$$\rho \frac{dA}{dt} + A \frac{d\rho}{dt} + \rho A \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{1}{\rho A} \left(\rho \frac{dA}{dt} + A \frac{d\rho}{dt} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{1}{A} \frac{dA}{dt} + \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.13)$$

になる。

一方、管路内の流体の体積弾性係数 K は

$$K = \frac{dp}{d\rho/\rho} \quad (2.14)$$

と表されるから、

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dp}{K} \quad (2.15)$$

そして、管の断面積は圧力 p についての関数になって

$$\frac{dA}{dt} = \frac{dA}{dp} \frac{dp}{dt} \quad (2.16)$$

式(2.15)と式(2.16)を式(2.13)に代入すると

$$\frac{1}{A} \left(\frac{dA}{dp} \frac{dp}{dt} \right) + \frac{1}{K} \frac{dp}{dt} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.17)$$

さらに、

$$\frac{1}{K} \frac{dp}{dt} \left(1 + \frac{K}{A} \frac{dA}{dp} \right) + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.18)$$

となる。

ここで、管内での音速 a は、

$$a^2 = \frac{K/\rho}{1 + (K/A)(dA/dp)} \quad (2.19)$$

であるから、

$$1 + (K/A)(dA/dp) = \frac{K}{\rho a^2} \quad (2.20)$$

となり、結局、式 (2.18) は

$$\frac{dp}{dt} + \rho a^2 \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (2.21)$$

となる [30]。

一般に、方程式内に空間変形項と時間変形項が存在する場合、空間変形項が時間変形項に比べて十分小さいので空間変形項を無視することができる [27]。以上のような運動及び連続方程式を圧力水頭 H 及び流量 Q で整理すれば、

$$\frac{\partial H}{\partial x} + \frac{1}{gA} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{fQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (2.22)$$

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (2.23)$$

となる。この基礎方程式を無次元化するために以下のような無次元変数を導入する [20,31]:

$$H^* = \frac{(H - H_0)}{H_0}, \quad t^* = \frac{t}{L/a}, \quad x^* = \frac{x}{L}, \quad Q^* = \frac{Q}{Q_0} \quad (2.24)$$

ここで、 H_0 : 上流タンクの初期圧力水頭、 Q_0 : 下流の初期流量、 L : 管路長、である。このとき、式(2.22)及び式(2.23)は、次のように無次元化される。

$$\frac{\partial H^*}{\partial x^*} + \frac{H_J}{H_0} \frac{\partial Q^*}{\partial t^*} + \frac{H_J f Q_0 L}{H_0 2aDA} Q^* |Q^*| = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{H_J}{H_0} \frac{\partial Q^*}{\partial x^*} = 0 \quad (2.26)$$

ここで、 $H_J \equiv aQ_0/gA$ である。

2.2 特性曲線法による解析

式 (2.25) と式 (2.26) は二つの従属変数 (流量 Q^* 、圧力水頭 H^*) と二つの独立変数 (管軸方向の座標 x^* 、時間 t^*) で構成された準線形双曲線型偏微分方程式である。この二つの微分方程式は特性曲線法によって四つの常微分方程式に変換される [32]。

式 (2.25) と式 (2.26) に適当な乗数 λ を掛けると、

$$\frac{\partial H^*}{\partial x^*} + \frac{H_J}{H_0} \frac{\partial Q^*}{\partial t^*} + \frac{H_J f Q_0 L}{H_0 2aDA} Q^* |Q^*| + \lambda \left(\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{H_J}{H_0} \frac{\partial Q^*}{\partial x^*} \right) = 0 \quad (2.27)$$

となる。ここで、 $F \equiv H_0/H_J$ 、 $R \equiv fQ_0L/(2aDAF)$ と置き、流量 Q^* と圧力水頭 H^* の項で分離すれば、

$$\frac{1}{F} \left(\frac{\partial Q^*}{\partial t^*} + \lambda \frac{\partial Q^*}{\partial x^*} \right) + \lambda \left(\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{1}{\lambda} \frac{\partial H^*}{\partial x^*} \right) + R Q^* |Q^*| = 0 \quad (2.28)$$

となる。ここで、流量と圧力水頭の全微分 (dQ^*/dt^* 、 dH^*/dt^*) は

$$\frac{dQ^*}{dt^*} = \frac{\partial Q^*}{\partial t^*} + V \frac{\partial Q^*}{\partial x^*}, \quad \frac{dH^*}{dt^*} = \frac{\partial H^*}{\partial t^*} + V \frac{\partial H^*}{\partial x^*}$$

であるから、式 (2.28) の各項との比較により、

$$V = \lambda, \quad V = \frac{1}{\lambda}$$

すなわち、

$$\lambda = \frac{1}{\lambda}, \quad \lambda^2 = 1$$

となる。したがって、二つの方程式を満足する λ は

$$\lambda = \pm 1 \quad (2.29)$$

になる。また、

$$V = \frac{dx}{dt} = \pm 1 \quad (2.30)$$

となる。よって、式 (2.28) は

$$\lambda \frac{dH^*}{dt^*} + \frac{1}{F} \frac{dQ^*}{dt^*} + RQ^*|Q^*| = 0 \quad (2.31)$$

となる。式 (2.31) は式 (2.29) や式 (2.30) の条件によって次のような四つの常微分方程式になる。

$$C^+ : \frac{dH^*}{dt^*} + \frac{1}{F} \frac{dQ^*}{dt^*} + RQ^*|Q^*| = 0 \quad (2.32)$$

$$\frac{dx^*}{dt^*} = 1 \quad (2.33)$$

$$C^- : \frac{dH^*}{dt^*} - \frac{1}{F} \frac{dQ^*}{dt^*} - RQ^*|Q^*| = 0 \quad (2.34)$$

$$\frac{dx^*}{dt^*} = -1 \quad (2.35)$$

式(2.32)及び(2.34)はそれぞれ式(2.33)と式(2.35)の条件下で満足される。

図(2.3)のようなシステムで、初期条件($t^* = 0$)でのA及びB地点の流量と圧力水頭が既知であれば、 C^+ 、 C^- 線に沿って式(2.32)と式(2.34)が成立し、P地点での未知数である流量 Q^* と圧力水頭 H^* は、これらの方程式から求められる[27]。

C^+ 線に沿っては、式(2.32)のように表される。ここで、図(2.3)のA、P地点間を C^+ 線に沿って積分すると、

$$\int_{H_A^*}^{H_P^*} dH^* + \frac{1}{F} \int_{Q_A^*}^{Q_P^*} dQ^* + R \int_{x_A^*}^{x_P^*} Q^* |Q^*| dx^* = 0 \quad (2.36)$$

式(2.36)の最終項を次のように近似する[33]。

$$\begin{aligned} \int_{x_A^*}^{x_P^*} Q^{*2} dx^* &= Q^{*2} x^* \Big|_{x_A^*}^{x_P^*} - \int_{x_A^*}^{x_P^*} x^* dQ^{*2} = Q^{*2} x^* \Big|_{x_A^*}^{x_P^*} - 2 \int_{x_A^*}^{x_P^*} x^* Q^* dQ^* \\ &\approx Q_P^{*2} x_P^* - Q_A^{*2} x_A^* - 2 \left[\frac{x_P^* Q_P^* + x_A^* Q_A^*}{2} (Q_P^* - Q_A^*) \right] \\ &\approx Q_P^* |Q_A^*| (x_P^* - x_A^*) \end{aligned}$$

これを式(2.36)へ代入し、整理すると

$$H_P^* - H_A^* + \frac{1}{F} (Q_P^* - Q_A^*) + R \Delta x^* Q_P^* |Q_A^*| = 0 \quad (2.37)$$

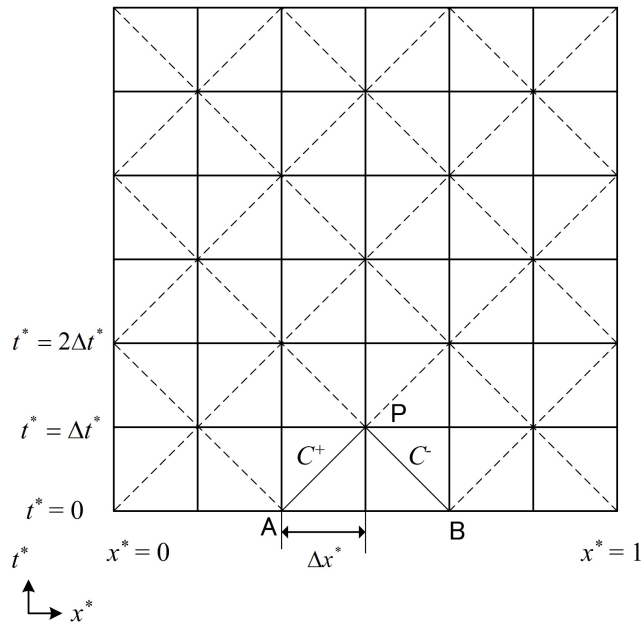


Fig. 2.3: The x - t grid for solving transient flow

となる。同様に、B と P 地点間の C^- 線へ適用すると、式 (2.34) は次のようになる。

$$H_P^* - H_B^* - \frac{1}{F}(Q_P^* - Q_B^*) - R\Delta x^* Q_P^* |Q_B^*| = 0 \quad (2.38)$$

さらに、式 (2.37) と (2.38) は次のように整理される。

$$H_P^* = C_P - B_P Q_P^* \quad (2.39)$$

$$H_P^* = C_M + B_M Q_P^* \quad (2.40)$$

ここで、

$$C_P = H_A^* + \frac{1}{F} Q_A^*, \quad B_P = \frac{1}{F} + R\Delta x^* |Q_A^*|$$

$$C_M = H_B^* - \frac{1}{F} Q_B^*, \quad B_M = \frac{1}{F} + R\Delta x^* |Q_B^*|$$

式(2.39)と式(2.40)を利用して、Pでの流量 Q^* と圧力水頭 H^* の計算をすると、

$$H_P^* = \frac{C_P B_M + C_M B_P}{B_P + B_M} \quad (2.41)$$

$$Q_P^* = \frac{C_P - C_M}{B_P + B_M} \quad (2.42)$$

になる。このように、初期値($t^*=0$)と境界の値($x^*=0$ 、 $x^*=1$)が与えられると、各節点での非定常流量 Q^* と圧力水頭 H^* の計算ができる。

2.3 非定常管摩擦抵抗

非定常流れの解析にも、管路抵抗を定常あるいは準定常摩擦抵抗で近似することが多い。この仮定は非定常流れの変化が緩やかで、非定常性が弱い場合には問題ない。しかし、流速と圧力の変化の速い非定常流れでは、実際の圧力と定常摩擦抵抗近似で計算された圧力は、時間の経過と共に、その差が大きくなる [34,35]。例えば、層流では、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ことが明らかにされている [27,36]。この不一致の程度は、流体の流れの条件 (非定常流れの伝播速度、流れ状態) と粘度などの流体物性によって支配される。

非定常管摩擦抵抗モデルはいくつかあるが [36–46]、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 $V(\partial V/\partial x)$ で評価する Brunone モデル [47] をすべての非定常条件にも適用可能に修正した Bergant らの式 [46]

$$f = f_s + \frac{kD}{V|V|} \left\{ \frac{\partial V}{\partial t} + a \cdot \text{sign}(V) \left| \frac{\partial V}{\partial x} \right| \right\} \quad (2.43)$$

を用いた。ここで、 f_s は定常管摩擦抵抗成分、 $\text{sign}(V) = +1 (V \geq 0)$ 、 $-1 (V \leq 0)$ 、Brunone の摩擦抵抗係数 k は

$$k = \sqrt{C^*}/2 \quad (2.44)$$

であり、 C^* は次式で表される Vardy のせん断減衰係数である [48]。

$$C^* = \begin{cases} 0.00476 & : \text{層流} \\ 7.41/Re^{\log(14.3/Re^{0.006})} & : \text{乱流} \end{cases} \quad (2.45)$$

上流にタンクがあり、末端のバルブを遮断する場合は、Bergantらの式(2.43)は次のようになる。

$$f = f_s + \frac{kD}{V|V|} \left(\frac{\partial V}{\partial t} - a \frac{\partial V}{\partial x} \right) \quad (2.46)$$

この式を、流量 Q によって整理、無次元化すると

$$f = f_s + \frac{kDAa}{LQ_0} \frac{1}{Q^*|Q^*|} \left(\frac{\partial Q^*}{\partial t^*} - \frac{\partial Q^*}{\partial x^*} \right) \quad (2.47)$$

となる。非定常管摩擦抵抗を考慮した式(2.47)を利用して運動及び連続方程式に反映して考えると次のようになる。

$$\frac{\partial H^*}{\partial t^*} + B \frac{\partial Q^*}{\partial x^*} = 0 \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial Q^*}{\partial t^*} + \frac{1}{B} \frac{\partial H^*}{\partial x^*} + \frac{R'}{B} Q^*|Q^*| + \frac{k}{2} \left(\frac{\partial Q^*}{\partial t^*} - \frac{\partial Q^*}{\partial x^*} \right) = 0 \quad (2.49)$$

ここで、 $B \equiv aQ_0/(gAH_0)$ 、 $R' \equiv Bf_sQ_0L/(2agDA)$ である。式(2.49)を整理すると次のようになる。

$$\frac{\partial Q^*}{\partial t^*} + \frac{2}{2+k} \frac{1}{B} \frac{\partial H^*}{\partial x^*} - \frac{k}{2+k} \frac{\partial Q^*}{\partial x^*} + \frac{2}{2+k} \frac{R'}{B} Q^*|Q^*| = 0 \quad (2.50)$$

式(2.48)に λ をかけて、式(2.50)と整理すると

$$\lambda \left\{ \frac{\partial H^*}{\partial t^*} + \frac{2}{B\lambda(2+k)} \frac{\partial H^*}{\partial x^*} \right\} + \left\{ \frac{\partial Q^*}{\partial t^*} + \left(B\lambda - \frac{k}{2+k} \right) \frac{\partial Q^*}{\partial x^*} \right\} + \frac{2}{2+k} \frac{R'}{B} Q^* |Q^*| = 0 \quad (2.51)$$

になる。ここで、

$$\frac{dx^*}{dt^*} = \frac{2}{B\lambda(2+k)} = B\lambda - \frac{k}{2+k} \quad (2.52)$$

となり、式(2.52)を λ に対して解くと

$$\lambda_1 = 1/B, \quad \lambda_2 = -2/B(2+k) \quad (2.53)$$

$$\left(\frac{dx^*}{dt^*} \right)_1 = \frac{2}{2+k}, \quad \left(\frac{dx^*}{dt^*} \right)_2 = -1 \quad (2.54)$$

になる。

式(2.54)を式(2.51)に代入することで、二つの特性方程式が得られる。

$$C^- : \quad \frac{dQ^*}{dt^*} + \frac{1}{B} \frac{dH^*}{dt^*} + \frac{2}{2+k} \frac{R'}{B} Q^* |Q^*| = 0 \quad (2.55)$$

$$\frac{dx^*}{dt^*} = \frac{2}{2+k} \quad (2.56)$$

$$C^+ : \quad \frac{dQ^*}{dt^*} + \frac{2}{B(2+k)} \frac{dH^*}{dt^*} + \frac{2}{2+k} \frac{R'}{B} Q^* |Q^*| = 0 \quad (2.57)$$

$$\frac{dx^*}{dt^*} = -1 \quad (2.58)$$

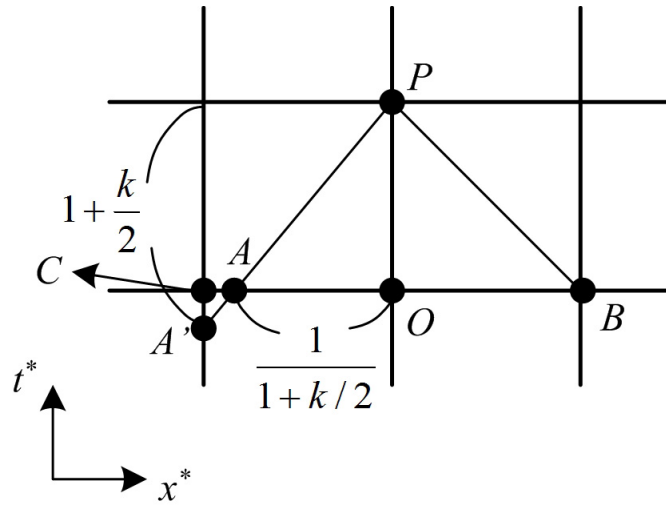


Fig. 2.4: Diagram for transient flow

図(2.4)のような節点では、次のように C^+ 及び C^- 線に沿って圧力水頭と流量を計算できる。 C^+ 、 C^- 線で、

$$H_P^* = (H_A^* + BQ_A^*) - Q_P^* \left(B + R' \frac{2}{2+k} |Q_A^*| \right) \quad (2.59)$$

$$H_P^* = \left\{ H_B^* + \frac{B(2+k)}{2} Q_B^* \right\} - Q_P^* \left\{ \frac{B(k+2)}{2} + R' |Q_B^*| \right\} \quad (2.60)$$

$$H_A^* = H_C^* + (H_O^* - H_C^*) \times \frac{k}{2+k} \quad (2.61)$$

$$Q_A^* = Q_C^* + (Q_O^* - Q_C^*) \times \frac{k}{2+k} \quad (2.62)$$

式(2.59)、(2.60)を用いて、次のように H_P^* 、 Q_P^* を求めることができる。

$$H_P^* = \frac{C_p B_m + C_m B_p}{B_p + B_m} \quad (2.63)$$

$$Q_P^* = \frac{C_p - C_m}{B_p + B_m} \quad (2.64)$$

ここで、

$$C_p = H_A^* + BQ_A^*, \quad B_p = B + R' \frac{2}{2+k} |Q_A^*|$$
$$C_m = H_B^* - \frac{B(2+k)}{2} Q_B^*, \quad B_m = \frac{B(2+k)}{2} + R' |Q_B^*|$$

である。

2.4 非定常流れ解析の適用

非定常逆解法では、非定常流れ計算によって、各 GA パラメータの適応度を評価する。それには、実際の非定常圧力変動を予測できる非定常流れの解析が必要となる。

ここでは、本研究の非定常流れ解析による計算結果を実験値と比較することによって、計算法の妥当性を検証する。非定常流れ解析で対象とした管路モデルを図(2.5)に示す。主管の全長 L が 86 m で、その下流端 ($x_{ins} = 82\text{ m}$) に軟らかい管 (管長 1 m 及び 2 m) を挿入した時の非定常流れを対象とする。非定常流れは、下流末端でのバルブを急遮断することで発生させる。

付録 A.1.3 で述べられる管路変形を考慮して、前述の非定常流れ解析を実施し、実験値と比較する。図(2.6)は、管端の弁を急閉鎖した時の圧力変化の測定値と計算値を比較したものである。

管の変形効果として、粘弾性性質を考慮した粘弾性モデル (viscoelastic model)、及び、粘弾性を考慮しない弾性モデル (elastic model) が考えられている (A.1.3 参照)。

図(2.6)には、急遮断後の圧力の時間履歴が示されており、実験値と計算値 (粘弾性モデル、弾性モデル) が併せて示されている。遅延変形成分による圧力損失が反映された粘弾性モデルの方が、実験値と良く一致することがこの図からわかる。

図(2.7)及び図(2.8)は、各々、軟らかい管を下流端に 1 m 及び 2 m 挿入

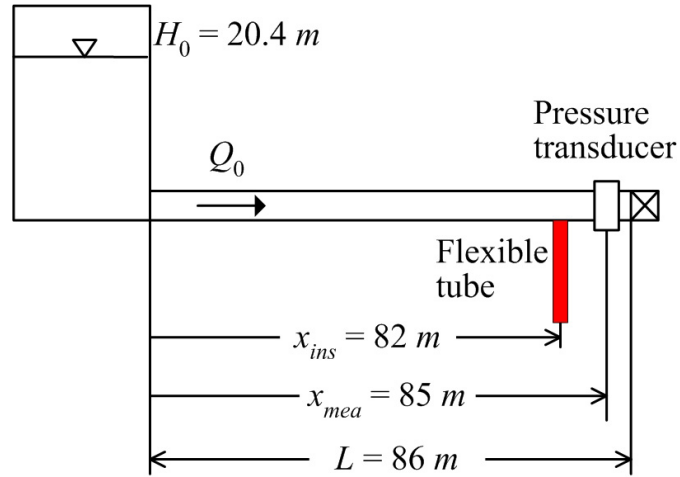


Fig. 2.5: Schematic of test pipe system; $x_{ins} = 82 \text{ m}$, $x_{mea} = 85 \text{ m}$, $L = 86 \text{ m}$

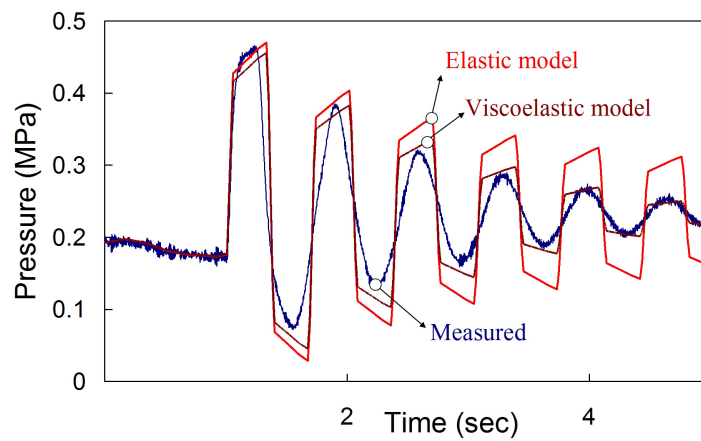


Fig. 2.6: Comparison of pressure calculated by elastic and viscoelastic model; $Q_0 = 10.28 \text{ l/min}$, $H_0 = 20.4 \text{ m}$, $x_{mea} = 85 \text{ m}$, $L = 86 \text{ m}$

した場合の計算値と実験値を比較したものである。軟らかい管を1 m、及び2 m挿入して実験した結果、最大圧力水頭は各々、0.22 MPa (1 m挿入の場合)、0.187 MPa (2 m挿入の場合)になった。一方、計算で求めた最大圧力水頭は0.226 MPa (1 m挿入の場合)、0.189 MPa (2 m挿入の場合)となり、2.73 %、1.07 %の誤差で実験結果を予測できた。非定常流れ解析の結果は実験値と良く一致しており、軟らかい管の長さによる非定常圧力の緩和効果を十分な精度で予測している。このことから、本研究の非定常流れ解析が妥当であることがわかる。

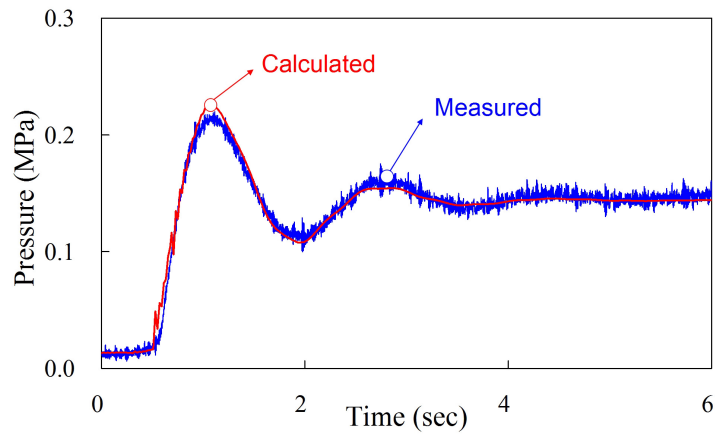


Fig. 2.7: Calculated and measured pressure with 1 *m*-length flexible tube inserted at downstream; $Q_0 = 15.62 \ell/min$, $H_0 = 20.4 m$, $x_{ins} = 82 m$, $x_{mea} = 85 m$, $L = 86 m$

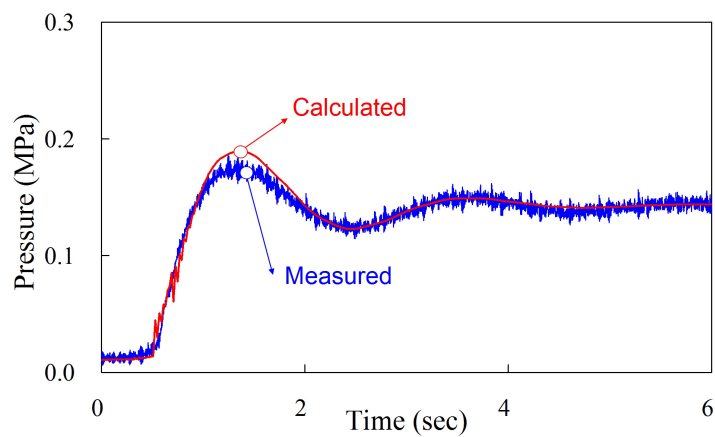


Fig. 2.8: Calculated and measured pressure with 2 *m*-length flexible tube inserted at downstream; $Q_0 = 15.62 \ell/min$, $H_0 = 20.4 m$, $x_{ins} = 82 m$, $x_{mea} = 85 m$, $L = 86 m$

2.5 漏れ管の非定常流れ解析

2.5.1 漏れの処理

管路中の漏れ部での漏れ流量 (Q_L^*) は、漏れ部の圧力水頭 (H_L^*) を用いてオリフィスの式で表現し、次のように表す [49]。

$$Q_L^* = \frac{C_d A_L}{Q_0} \sqrt{2gH_0(H_L^* + 1)} \quad (2.65)$$

$$= \frac{C_d A_L}{Q_0} \sqrt{2gH_0} \sqrt{(H_L^* + 1)} \quad (2.66)$$

ここで、 C_d : オリフィス係数、 A_L : 漏れ部の断面積、 H_0 : 上流タンクの初期圧力水頭である。

図(2.9)は、漏れのある管路の非定常流れ解析のための節点関係を表したものである [50]。漏れがL1とL2の間で発生するとき、漏れ部の圧力水頭 (H_L^*) と漏れ流量 (Q_L^*) は次のようになる [51]。

$$H_L^* = H_{P1}^* = H_{P2}^* \quad (2.67)$$

$$Q_{P1}^* - Q_{P2}^* - Q_L^* = 0 \quad (2.68)$$

図(2.9)で、特性曲線法によって初期値から次の時間の値を計算すれば、

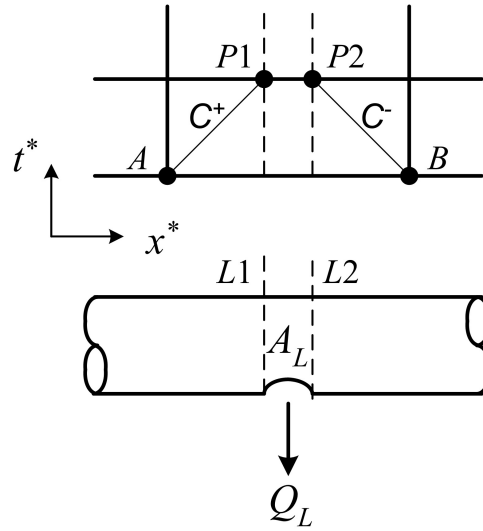


Fig. 2.9: Nodes with leak

$$C^+ : \quad Q_{P1}^* = \frac{C_P - H_{P1}^*}{B_P} \quad (2.69)$$

$$C^- : \quad Q_{P2}^* = \frac{H_{P2}^* - C_M}{B_M} \quad (2.70)$$

になる。ここで、

$$C_P = H_A^* + \frac{1}{F} Q_A^*, \quad B_P = \frac{1}{F} + R \Delta x^* |Q_A^*|$$

$$C_M = H_B^* - \frac{1}{F} Q_B^*, \quad B_M = \frac{1}{F} + R \Delta x^* |Q_B^*|$$

$$H_J \equiv \frac{a Q_0}{g A}, \quad F \equiv \frac{H_0}{H_J}, \quad R \equiv \frac{f Q_0 L}{2 a D A F}$$

である。式(2.68)に式(2.66)、(2.69)、(2.70)を代入すると

$$\frac{C_P - H_{P1}^*}{B_P} - \frac{H_{P2}^* - C_M}{B_M} - \frac{C_d A_L}{Q_0} \sqrt{2gH_0} \sqrt{(H_L^* + 1)} = 0 \quad (2.71)$$

となる。この式を、式(2.67)の関係から漏れ部の圧力水頭(H_{P1}^* 、 H_{P2}^*)を H_L^* として整理すると、

$$H_L^* + \frac{C_d A_L}{Q_0} \sqrt{2gH_0} \frac{B_P B_M}{B_P + B_M} \sqrt{(H_L^* + 1)} - \frac{C_P B_M + C_M B_P}{B_P + B_M} = 0 \quad (2.72)$$

になる。ここで、

$$X \equiv \sqrt{H_L^* + 1}$$

$$\alpha \equiv \frac{C_d A_L}{Q_0} \frac{B_P B_M}{B_P + B_M} \sqrt{2gH_0}$$

$$\beta \equiv \frac{C_P B_M + C_M B_P}{B_P + B_M} - 1$$

とすると、式(2.72)は、

$$X^2 + \alpha X - \beta = 0 \quad (2.73)$$

になる。

式(2.73)の解から、漏れ部の圧力水頭 H_L^* は

$$H_L^* = \left(\frac{-\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 4\beta}}{2} \right)^2 - 1 \quad (2.74)$$

となる。 H_L^* が決まると、式(2.66)から漏れ流量 Q_L^* が計算できる。

2.5.2 漏れ管の初期値計算

特性曲線法を利用して非定常流れを解析するときは、図(2.3)に示したように、空間(x)と時間(t)領域を dx と dt で分割して計算する。定常状態では、 x 方向の各節点での流量や圧力値は、時間が経過しても変化しない。しかし、非定常状態では、時間の経過と共に、節点での流量や圧力値が変化する。

初期値である $t=0$ での x 方向の各節点における流量及び圧力から特性方程式を満足する C^+ 、 C^- 線に沿って、次の時刻($t = \Delta t$)の圧力及び流量を計算する。時刻($t = \Delta t$)での全節点の圧力と流量の値が得られると、また次の時刻($t = 2\Delta t$)での値が計算できる。このように、次の時刻での流量と圧力値を計算するためには、前の時刻での値が必要である。

(a) 漏れが1箇所の場合

図(2.10)は漏れ部周辺の節点を表現したものである。圧力及び質量の平衡を考えれば、

$$H_L = H_1 - R\Delta x_1 Q_1 |Q_1| \quad (2.75)$$

$$Q_1 = Q_L + Q_2 \quad (2.76)$$

が得られる。

漏れ部でのオリフィス式(2.66)と(2.76)を式(2.75)に代入すると、 H_L

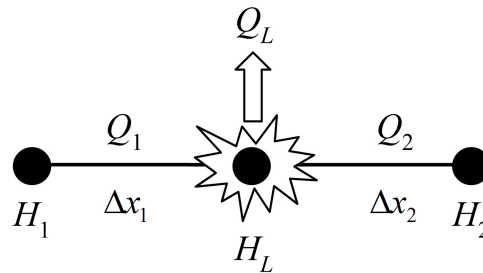


Fig. 2.10: Leak in pipe

に対する方程式が得られる。境界条件として、上流の圧力水頭 (H_1) と下流の流量 (Q_2) が与えられれば、漏れ部での圧力水頭 (H_L) と漏れ流量 (Q_L) を求めることができる。

$$H_L = H_1 - C_b C_a^2 (H_L + 1) + Q_2^2 + 2C_a Q_2^2 \sqrt{H_L + 1} \quad (2.77)$$

ここで、 $C_a \equiv C_d A_L \sqrt{2gH_1}/Q_2$ 、 $C_b \equiv R\Delta x_1$ 、である。式(2.77)から、境界条件 (H_1 、 Q_2) の変化がない場合でも、漏れ部での圧力水頭 (H_L) と漏れ流量 (Q_L) は、 C_a 及び C_b の中の漏れ部の断面積 A_L と漏れの位置 Δx_1 の値によって変わることが確認できる。

(b) 漏れが2箇所の場合

図(2.11)のように漏れが二箇所が存在する場合は、上流側の圧力水頭 (H_1) と下流側の流量 (Q_3) が境界条件である。非定常値を計算するために求めるのは漏れ部での圧力水頭 (H_{L1} 、 H_{L2}) と漏れ流量 (Q_{L1} 、 Q_{L2}) である。図(2.11)の場合、圧力及び質量の平衡を考えれば、次の関係が成立

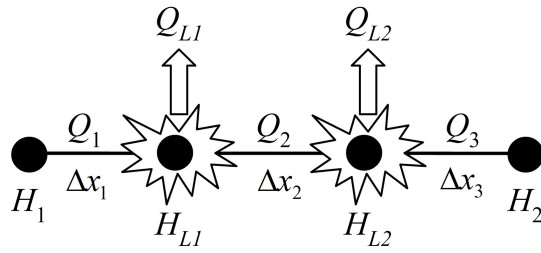


Fig. 2.11: Two leaks in pipe

する。

$$H_{L1} = H_1 - C_a \Delta x_1 Q_1 |Q_1|, \quad H_{L2} = H_1 - C_a \Delta x_2 Q_2 |Q_2| \quad (2.78)$$

$$Q_1 = Q_{L1} + Q_2, \quad Q_2 = Q_{L2} + Q_3 \quad (2.79)$$

ここで、 $C_a \equiv fQ_0^2 L / 2gaDA^2 H_0$ である。式(2.79)を式(2.78)に代入すると次のようになる。

$$H_{L1} = H_1 - C_a \Delta x_1 (Q_{L1} + Q_{L2} + Q_3) |Q_{L1} + Q_{L2} + Q_3|, \quad (2.80)$$

$$H_{L2} = H_{L1} - C_a \Delta x_2 (Q_{L2} + Q_3) |Q_{L2} + Q_3| \quad (2.81)$$

漏れ部での漏れ流量は、その点での圧力と関係するオリフィスの式で次のように表現できる。

$$Q_{L1} = C_{b1} \sqrt{H_{L1} + 1}, \quad Q_{L2} = C_{b2} \sqrt{H_{L2} + 1} \quad (2.82)$$

ここで、 $C_{b1} \equiv C_d A_{L1} / Q_0 \sqrt{2gH_0}$ 、及び、 $C_{b2} \equiv C_d A_{L2} / Q_0 \sqrt{2gH_0}$ 、である。式(2.82)を式(2.80)及び(2.81)に代入し、圧力について整理すると次のようになる。

$$H_{L1} = H_1 - C_a \Delta x_1 (C_{b1} \sqrt{H_{L1} + 1} + C_{b2} \sqrt{H_{L2} + 1} + Q_3) |C_{b1} \sqrt{H_{L1} + 1} + C_{b2} \sqrt{H_{L2} + 1} + Q_3| \quad (2.83)$$

$$H_{L2} = H_{L1} - C_a \Delta x_2 (C_{b2} \sqrt{H_{L2} + 1} + Q_3) |C_{b2} \sqrt{H_{L2} + 1} + Q_3| \quad (2.84)$$

ここで、 $X \equiv \sqrt{H_{L1} + 1}$ 、 $Y \equiv \sqrt{H_{L2} + 1}$ とし、境界条件である $H_1 = 0$ 、 $Q_3 = 1$ を代入すると式(2.83)及び(2.84)は次のようになる。

$$X^2(1 + \Delta x_1 C_a C_{b1}^2 + \Delta x_1 C_a C_{b1} Y^2 + 2\Delta x_1 C_a C_{b1} XY + 2\Delta x_1 C_a C_{b1} X + 2\Delta x_1 C_a C_{b1} Y + \Delta x_1 C_a - 1) = 0 \quad (2.85)$$

$$Y^2(1 + \Delta x_2 C_a C_{b2}^2) - X^2 + 2\Delta x_2 C_a C_{b2} Y + \Delta x_2 C_a = 0 \quad (2.86)$$

式(2.85)と(2.86)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。

$$f(X, Y) = X^2(1 + \Delta x_1 C_a C_{b1}^2) + \Delta x_1 C_a C_{b1}^2 Y^2 + 2\Delta x_1 C_a C_{b1} XY + 2\Delta x_1 C_a C_{b1} X + 2\Delta x_1 C_a C_{b1} Y + \Delta x_1 C_a - 1 = 0 \quad (2.87)$$

$$g(X, Y) = Y^2(1 + \Delta x_2 C_a C_{b2}^2) - X^2 + 2\Delta x_2 C_a C_{b2} Y + \Delta x_2 C_a = 0 \quad (2.88)$$

$f(X, Y) = 0$ 及び $g(X, Y) = 0$ の解を求めるためにニュートン法を適用する [52, 53]。

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial f(X^{(n)}, Y^{(n)})}{\partial X} & \frac{\partial f(X^{(n)}, Y^{(n)})}{\partial Y} \\ \frac{\partial g(X^{(n)}, Y^{(n)})}{\partial X} & \frac{\partial g(X^{(n)}, Y^{(n)})}{\partial Y} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -f(X^{(n)}, Y^{(n)}) \\ -g(X^{(n)}, Y^{(n)}) \end{bmatrix} \quad (2.89)$$

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

$$\frac{\partial f(X^{(n)}, Y^{(n)})}{\partial X} = 2(1 + \Delta x_1 C_a C_{b1}^2)X^{(n)} + 2\Delta x_1 C_a C_{b1}^2 Y^{(n)} + 2\Delta x_1 C_a C_{b1} \quad (2.90)$$

$$\frac{\partial f(X^{(n)}, Y^{(n)})}{\partial Y} = 2\Delta x_1 C_a C_{b1}^2 Y^{(n)} + 2\Delta x_1 C_a C_{b1}^2 X^{(n)} + 2\Delta x_1 C_a C_{b1} \quad (2.91)$$

$$\frac{\partial g(X^{(n)}, Y^{(n)})}{\partial X} = 2X^{(n)} \quad (2.92)$$

$$\frac{\partial g(X^{(n)}, Y^{(n)})}{\partial Y} = 2(1 + \Delta x_2 C_a C_{b2}^2)Y^{(n)} + 2\Delta x_2 C_a C_{b2} \quad (2.93)$$

初期推定値 $X^{(0)}$ 、 $Y^{(0)}$ からスタートして、反復公式 (2.89) 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、漏れ部の圧力水頭と漏れ流量を求める [54]。

第3章 非定常逆解法

3.1 非定常逆解法

非定常逆解法 (The inverse transient method) 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 [55]。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 (The inverse method) 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。

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 (A.2 参照)。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、Liggett と Chen 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 [21]。

図(3.1)は非定常逆解法の概略である。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。

全体的な流れは図(3.1)のようになる。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適応度を評価する。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 (inverse solver) 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、管摩擦係数などを選択し、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す。

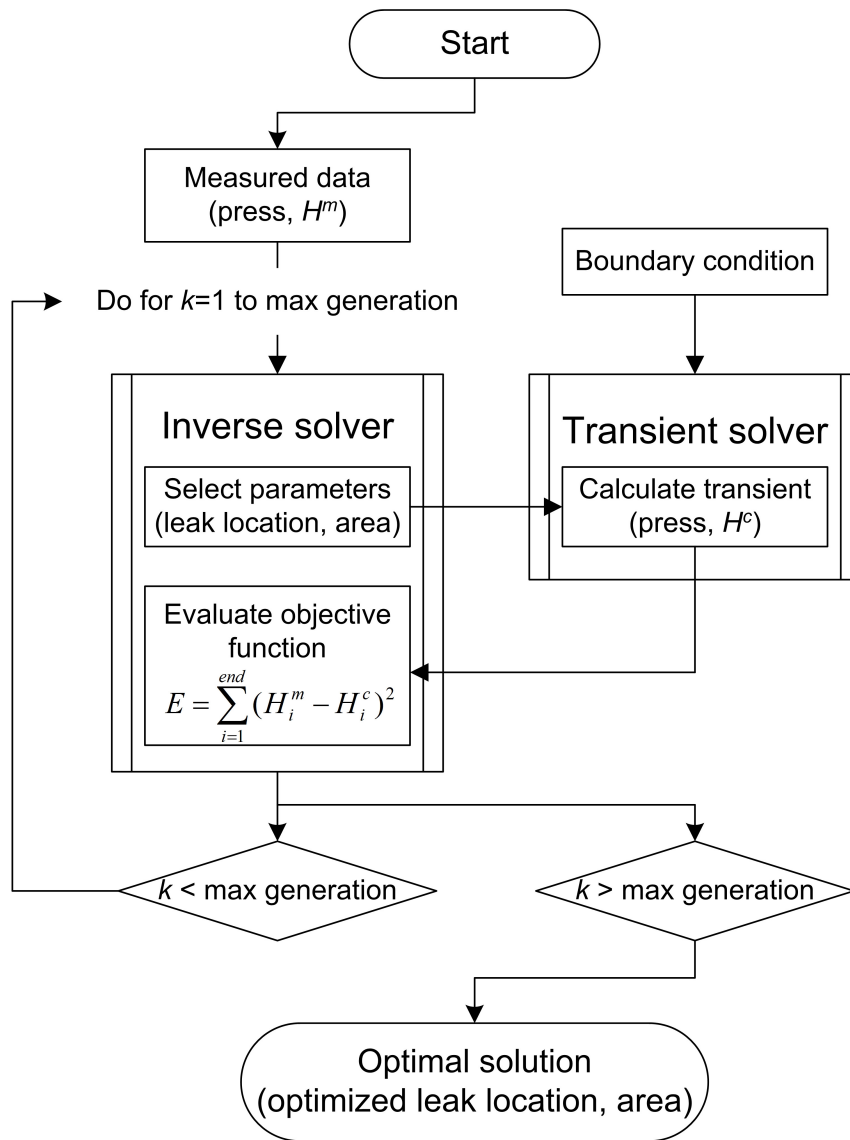


Fig. 3.1: Flow chart of inverse transient method

3.2 遺伝的アルゴリズム

遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm; GA) は John Holland ら [56] によって1960年代に考案されたもので、自然界におけるシステムの適応過程を説明し、生物の進化メカニズムを模擬しようとする人工的なモデルである。GAは解くべき問題の解を染色体として表現し、それらを任意に複数個設定することにより集団を形成する。その上で、一種の自然選択とGAオペレーター(交叉、突然変異、逆位など)を用いて、親より優れた新たな別の集団を生成することで、線形及び非線形問題の確率的に優れた解を求める方法である [57,58]。本研究では、HouckらによるMATLAB[®]のための Genetic Algorithm Optimization Toolbox [59] を利用し、MATLAB[®]による非定常流れ計算結果と連結できるようにした。GAドライバには、一般に公開され入手可能なものを改良した。図(3.2)に本研究におけるGAの流れ図を示す。

3.2.1 パラメータの表現法

GAにおいて、パラメータを表現するためのコーディング法としては、バイナリコーディング(binary coding)、グレイコーディング(gray coding)、実数値コーディング(real coding)がある。Hollandによる初期のモデルではバイナリコーディングが使用されたが、本研究では、より自然で、問題を定義しやすく、性能面でも優れた実数値コーディングを採用した [60]。

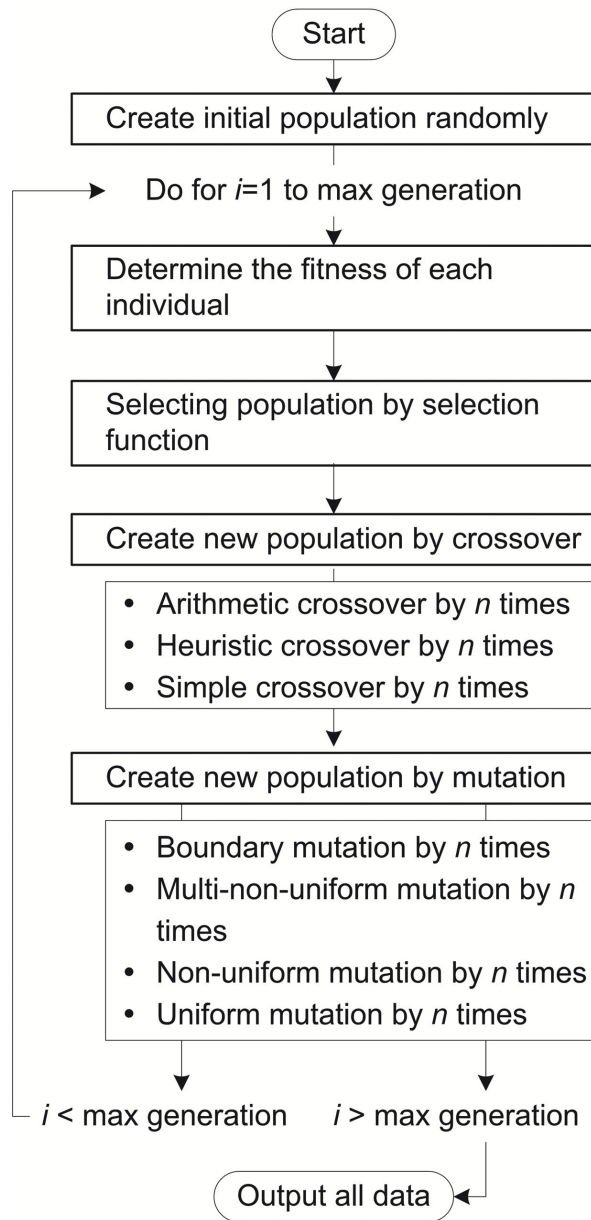


Fig. 3.2: GA flow chart

3.2.2 選択の方法

選択は生物の自然淘汰をモデル化したもので、適応度に基づいて個体を増やしたり削除したりする操作である。適応度が高い個体を選ばれるようにする確率的な作業であり、選択方法には、ルーレット選択 (roulette wheel selection)、トーナメント選択 (tournament selection)、エリート戦略 (elite strategy)、ランキング選択 (ranking selection) などがある。

この中で、ランキング選択は、各個体を適応度によってランク付けして、1位なら確率 q_1 、2位なら確率 q_2 という様に、ランクごとにあらかじめ選択確率を決めておく方式である。この方法は、ルーレット選択と違い、選択確率が適応度の格差に影響されないのが特徴である。

本研究では、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) を利用した [61]。個体 x_k のランクが r_k ($r_k = 1, 2, \dots, N$) 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。

$$p_k = q'(1-q)^{r_k-1} \quad (3.1)$$

ここで、

$$q' = \frac{q}{1-(1-q)^N} \quad (3.2)$$

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

択確率である。

3.2.3 遺伝的オペレーター

遺伝的オペレーター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。主なオペレーター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。本研究では、実数値コーディングのための交叉として、単純交叉 (simple crossover)、算術交叉 (arithmetic crossover)、及びヒューリスティック交叉 (heuristic crossover) を利用した。実数値コーディングの突然変異としては、一様突然変異 (uniform mutation)、非一様突然変異 (non-uniform mutation)、多非一様突然変異 (multi-non-uniform mutation)、及び環境突然変異 (boundary mutation) を利用した。

(a) 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 にすると、

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

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

のように表現できる。

単純交叉 (simple crossover) では、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

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

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

のようになる。ここで、 i は、 $1 \leq i \leq (\text{パラメータ数} - 1)$ の常数である。

算術交叉 (arithmetic crossover) は、 $0 \sim 1$ での一様乱数 r_1 を選び、親 Π_1 と Π_2 から、次のようにして、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。

$$\pi_1 = r_1 \times (bt - wt) + bt$$

$$\pi_2 = bt$$

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

(b) 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を置換する過程である。親個体 $\Pi = [P_1(\Pi) \quad P_2(\Pi) \quad P_3(\Pi)]$ のパラメータを一つ選択して、そのパラメータを範囲内でランダムに置換する。

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

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

ここで、パラメータ P_2 の範囲は $left(P_2) \leq P_2 \leq right(P_2)$ で、 mp はランダムに選択された置換するパラメータの順番である。

非一様突然変異 (non-uniform mutation) は、親個体のパラメータを一つ選び、非一様確率分布に基づいて置換する。

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

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

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

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、 r_1 、及び r_2 は $0 \sim 1$ の一様乱数である。

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。

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

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

ここで、パラメータ P_1 の範囲は $left(P_1) \leq P_1 \leq right(P_1)$ である。

第4章 管路における漏れの探索例

4.1 漏れが1箇所の場合

4.1.1 供試管路

図(4.1)は計算対象とするシステムの概略である。本項では、漏れが管路中で一箇所のみの場合を考える。作動流体は水とし、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となっている。管路の長さ L は $1,000\text{ m}$ で、過渡流れは下流端のバルブを 0.05 秒で閉鎖することによって発生される。下流端のバルブでの初期流量 Q_0 は 2.0 l/s で、このときのレイノルズ数は $11,160$ である。音速 a は $1,300\text{ m/s}$ で、定常管摩擦係数 f は 0.0302 とする。

漏れの位置、圧力測定位置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 、 0.4 、 0.6 、 0.8 とする。圧力測定位置については、1箇所と2箇所の場合に対して探索結果を比較する。GAパラメータは、漏れの位置 x_L^* 、漏れの大きさ $C_d A_L / A$ 、管摩擦係数 f で構成する。

GAで最適化するパラメータである漏れの位置 x_L^* は、管路全体の漏れ

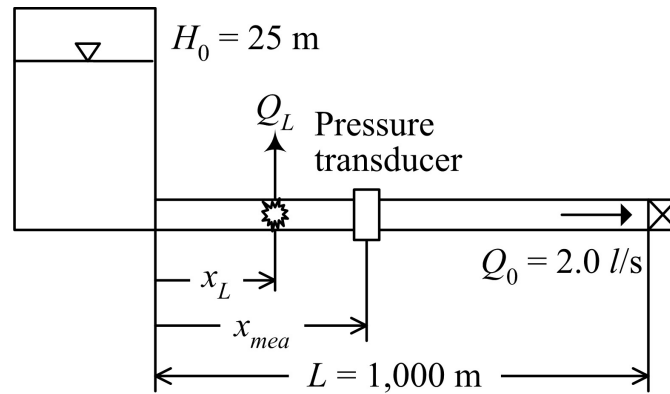


Fig. 4.1: Pipeline connecting upstream reservoir and downstream valve with 1 leak; $L = 1000\text{ m}$, $H_0 = 25\text{ m}$, $Q_0 = 2.0\text{ l/s}$, $a = 1,300\text{ m}$, $f = 0.0302$

を 0.0001 の刻みで探索できるようにした。漏れの大きさの探索範囲は $0 \leq C_d A_L / A \leq 0.1$ として、管断面積の最大 10% までの漏れ断面積を持つ漏れが探索できるようにした。また、管摩擦係数の範囲は $0 \leq f \leq 0.1$ として探索を行った。漏れの大きさ $C_d A_L / A$ 及び管摩擦係数 f は、0.0001 の刻みで各々の範囲で探索する。

境界条件である上流の圧力 H_0 と下流の初期流量 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 の適応度を評価するための目的関数には、測定で得られた値にモデルから想定した値を評価するために一般的に使われる最小二乗法を利用し [62]、測定された圧力値 H^m と計算から求められた圧力値 H^c の二乗差で適応度を評価した。

$$Ev = \sum_{i=1}^{end} (H_i^m - H_i^c)^2 \quad (4.1)$$

4.1.2 漏れの位置による影響

図(4.1)のように、管路中の漏れが1箇所、圧力測定も1箇所で行ったときの探索結果について検討する。GAでは、初期世代の個体をランダムに選び、その後の突然変異、交叉、選択もランダムに行うため、いつも同じ探索結果になるとは限らない[24]。そこで、各条件での探索傾向を調べるために、初期集団数200、最大世代数100、突然変異は世代ごとに4回、交叉も4回行う条件で、探索を行った。計算にはdell-8400(Pentium 4 CPU、3.4GHz、2G RAM)を利用した。

まず、漏れの位置による影響を調べる。探索結果に基づき、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を表(4.1)に示す。ここで、各条件での探索は100回行われている。表(4.1)から、漏れの位置を5%以内の精度で探索できる確率は、漏れの位置によって、72.5% ($x_L^* = 0.5$) から95.5% ($x_L^* = 0.25$) までの差があることがわかる。これは、漏れが管路中のどこに位置するかによって、漏れの探索精度が変化する可能性もあることを示している。

漏れの位置による探索傾向を見るために、同一の圧力測定位置 ($x_{mea}^* = 0.8$) で、漏れの大きさ ($C_d A_L / A = 0.001$) と管摩擦係数 ($f = 0.0302$) は固定し、漏れの位置 x_L^* だけを0.25と0.5に変化させた場合の最適化過程の

Table 4.1: Percents of detecting leak location less than 5 % difference; $C_d A_L/A = 0.001$, $f = 0.0302$

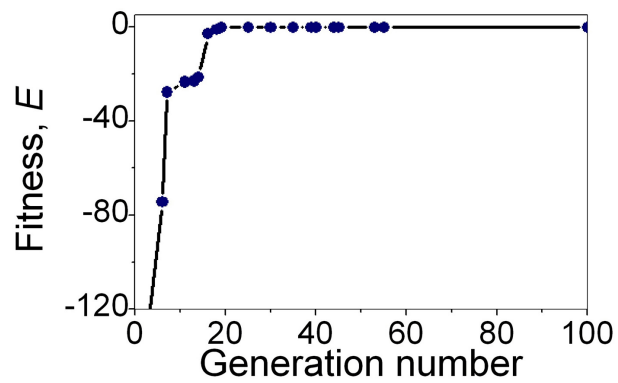
x_{mea}^* \ x_L^*	0.25	0.5	0.75	Mean
0.2	94	75	100	89.7
0.4	99	75	100	91.3
0.6	89	63	71	74.3
0.8	100	77	86	87.7
Mean	95.5	72.5	89.3	85.8

一例を図(4.2)及び図(4.3)に示す。図(4.2)では、実際の漏れの位置 x_L^* が 0.25、圧力測定点 x_{mea}^* が 0.8 のときの適応度 E_v 及び GA パラメータ (x_L^* 、 $C_d A_L/A$ 、 f) の探索過程を示す。

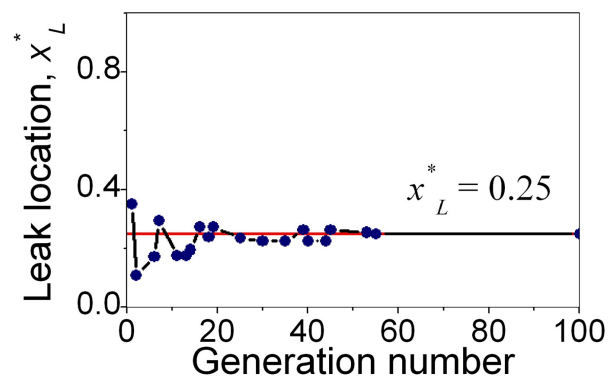
図(4.3)は、圧力測定点 x_{mea}^* は同一で、実際の漏れの位置を $x_L^* = 0.5$ にしたときの探索過程を示したものである。目的関数の適応度 E_v は、いずれの場合も繰り返し数と共に改善されている。しかし、図(4.2)に示される $x_L^* = 0.25$ の場合には、漏れの位置及び他のパラメータが正しく探索されているのに対して、 $x_L^* = 0.5$ の場合には、実際の漏れの位置、漏れの大きさ、管摩擦係数が正しく探索されていない。すなわち、 $x_L^* = 0.5$ の場合には、真の解の代わりに、局所解に収束している。真の解が $x_L^* = 0.5$ 、 $C_d A_L/A = 0.001$ 、 $f = 0.0302$ であるのに対し、計算で探索された値は $x_L^* = 0.925$ 、 $C_d A_L/A = 0.0005$ 、 $f = 0.0558$ であった。

このような結果の原因を調べるために、真の解である圧力測定点での測定圧力値 H^m と探索された漏れの状態での圧力測定点の計算圧力値 H^c を比較した。図(4.4)は測定圧力 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 (x_L^*)、漏れの大きさ ($C_d A_L/A$)、管摩擦係数 (f) は異なるものの、両条件での圧力値はほぼ一致している。三つのパラメータが相互に影響し、類似な圧力挙動を示している。実際の漏れが $x_L^* = 0.5$ 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に収束する傾向があるので、漏れが 0.25 と 0.75 にあるときより探索精度が低下することが確認できる。

これらの結果から、漏れが管路中のどこに位置するかによって漏れの探索結果が局所解に収束する可能性が変わるので、このような漏れの位置による傾向を考慮して、局所解を回避できる探索条件で探索を行う必要があると考えられる。

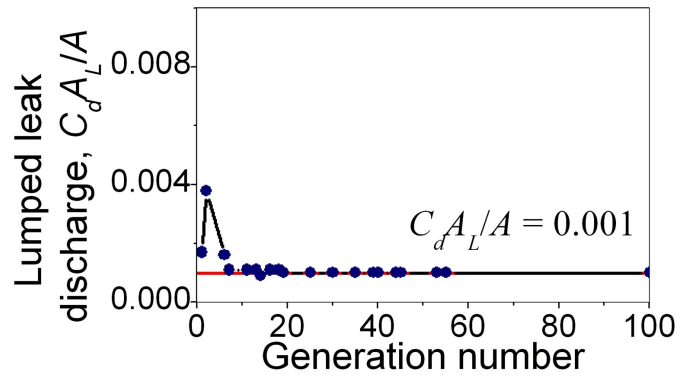


(A) Fitness

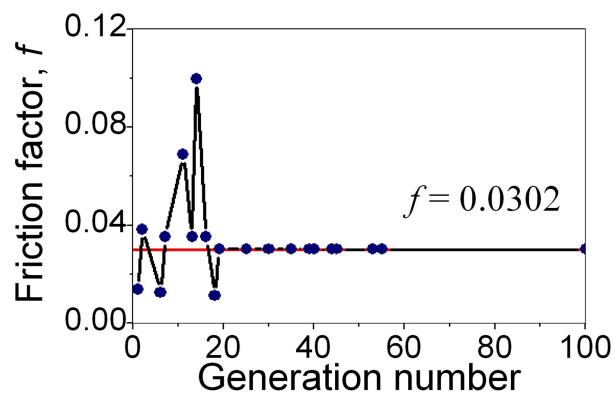


(B) Calculated leak location

Fig. 4.2: Leak detection process of good example (1); $x_L^* = 0.25$, $x_{mea}^* = 0.8$, $C_d A_L / A = 0.001$, $f = 0.0302$

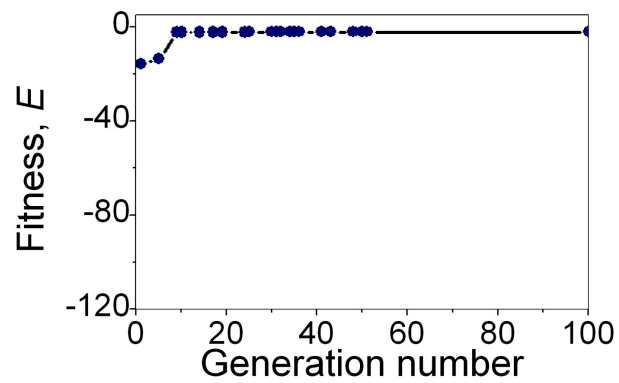


(C) Calculated leak discharge coefficient

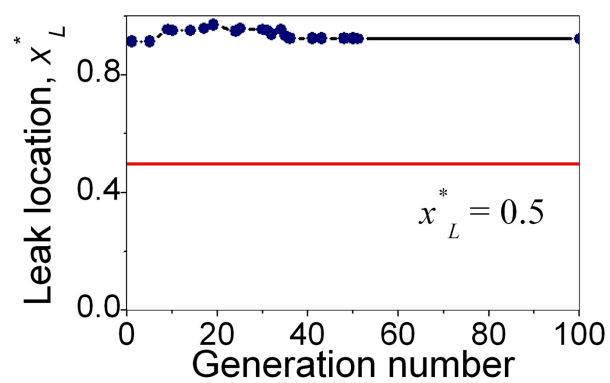


(D) Calculated friction factor

Fig. 4.2: Leak detection process of good example (2); $x_L^* = 0.25$, $x_{mea}^* = 0.8$, $C_d A_L / A = 0.001$, $f = 0.0302$

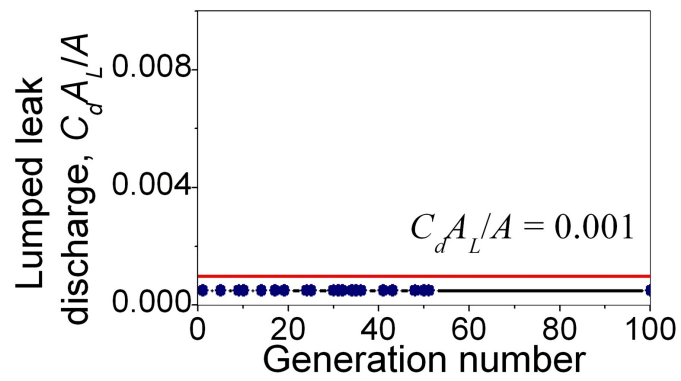


(A) Fitness

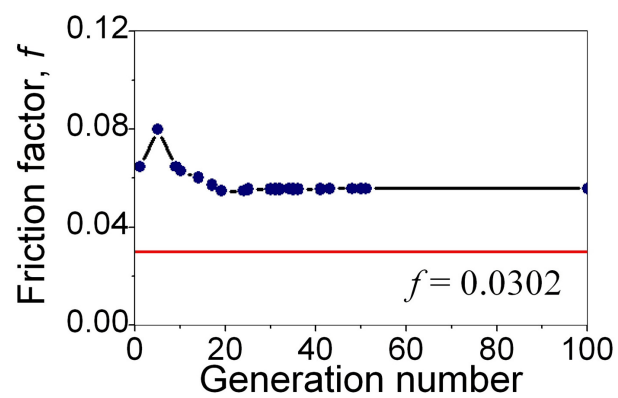


(B) Calculated leak location

Fig. 4.3: Leak detection process of wrong example (1); $x_L^* = 0.5$, $x_{mea}^* = 0.8$, $C_d A_L / A = 0.001$, $f = 0.0302$



(C) Calculated leak discharge coefficient



(D) Calculated friction factor

Fig. 4.3: Leak detection process of wrong example (2); $x_L^* = 0.5$, $x_{mea}^* = 0.8$, $C_d A_L / A = 0.001$, $f = 0.0302$

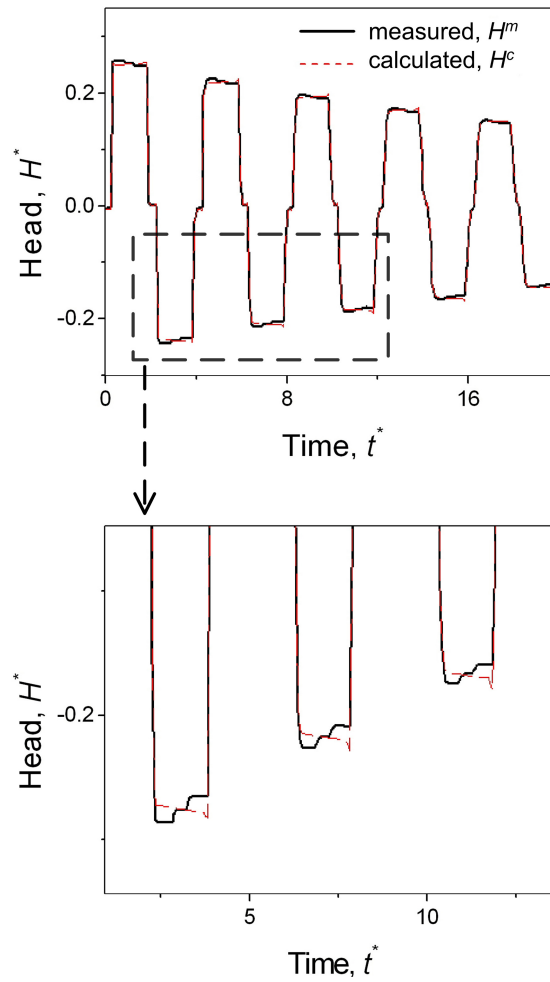


Fig. 4.4: Time histories of static head at x_{mea}^* for measured data ($x_L^* = 0.5$, $C_d A_L/A = 0.001$, $f = 0.0302$) and calculated data ($x_L^* = 0.925$, $C_d A_L/A = 0.0005$, $f = 0.0558$); $x_{mea}^* = 0.8$

4.1.3 GA パラメータ数による影響

図(4.1)のようなシステムで、管摩擦係数が既知である場合、任意地点での定常圧力を測定することによって漏れの有無の判断ができる。すなわち、漏れの無い場合には、 H_0 と Q_0 が与えられれば、次式から測定点での圧力 (H_{mea}) が計算できる。

$$H_{mea} = H_0 - \frac{x_{mea} \cdot f}{2gdA^2} Q_0 |Q_0| \quad (4.2)$$

したがって、上式で計算された圧力と測定圧力の間に差があるときには、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 (f) が把握できない場合、あるいは、既知とした管摩擦係数が実際の管摩擦係数と異なる場合には、漏れの有無の判定ができなくなる。

非定常逆解法を利用する場合には、管摩擦係数 f が未知であっても、 f を GA パラメータとして探索できる。もし、管摩擦係数 f が既知である場合は、GA パラメータを漏れの位置と漏れの大きさの二つとして探索を行えばよい。

図(4.5)及び図(4.6)は、各々、漏れの位置が $x_L^* = 0.25$ 、圧力測定点が $x_{mea}^* = 0.2$ のとき、GA パラメータに管摩擦係数 f を含めて3パラメータとした場合、及び、漏れの位置 x_L^* と漏れの大きさ $C_d A_L / A$ のみの2パラメータの場合の探索結果である。同一の探索条件において、2パラメータの場合には100回の探索結果、全部真の解に収束しているのに対して、3パラメータの場合は、一部の結果が真の解ではなく、局所解に収束する傾

向を示している。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 $x_L^* = 0.25, 0.5, 0.75$ と変化させ、圧力測定点を $x_{mea}^* = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ にした場合、2パラメータの場合は87.7%、3パラメータでは85.5%の確率で、漏れの位置を5%以内の精度で探索できた。

GAは、求めるパラメータの解を一つの個体の染色体として扱うので、パラメータの数が増えるとGAの個体も複雑になる。漏れの位置と大きさの2パラメータの場合は、個体が x_L^* と $C_d A_L/A$ で構成されるが、3パラメータになると、個体は x_L^* 、 $C_d A_L/A$ 、 f で構成され、複雑になる。パラメータ数が増えて個体が複雑になると、探索する領域が広がり、解を求めるのに時間がかかる。同一の探索条件であれば、2パラメータで探索を行った方が3パラメータより簡単である。パラメータの中で、探索前に決定することが可能で探索過程に及ぼす影響が少ないパラメータがあれば、それを除外してパラメータ数を少なくした方が、探索が簡単にできると考えられる。

管摩擦係数の影響を調べるために、管摩擦係数に真の値に対して上下 $\pm 10\%$ の誤差のある値($f = 0.0332$ 、及び $f = 0.0272$)を与えて二つのパラメータ x_L^* 、 $C_d A_L/A$ を探索した結果が図(4.7)及び式(4.8)である。管摩擦係数 f が真の値より10%大きい場合($f = 0.0332$)に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。これらの結果から、漏れの位置と管摩擦係数はほぼ比例関係にあり、非定常逆解法では管摩擦係数が多少真の値と違って、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わかった。

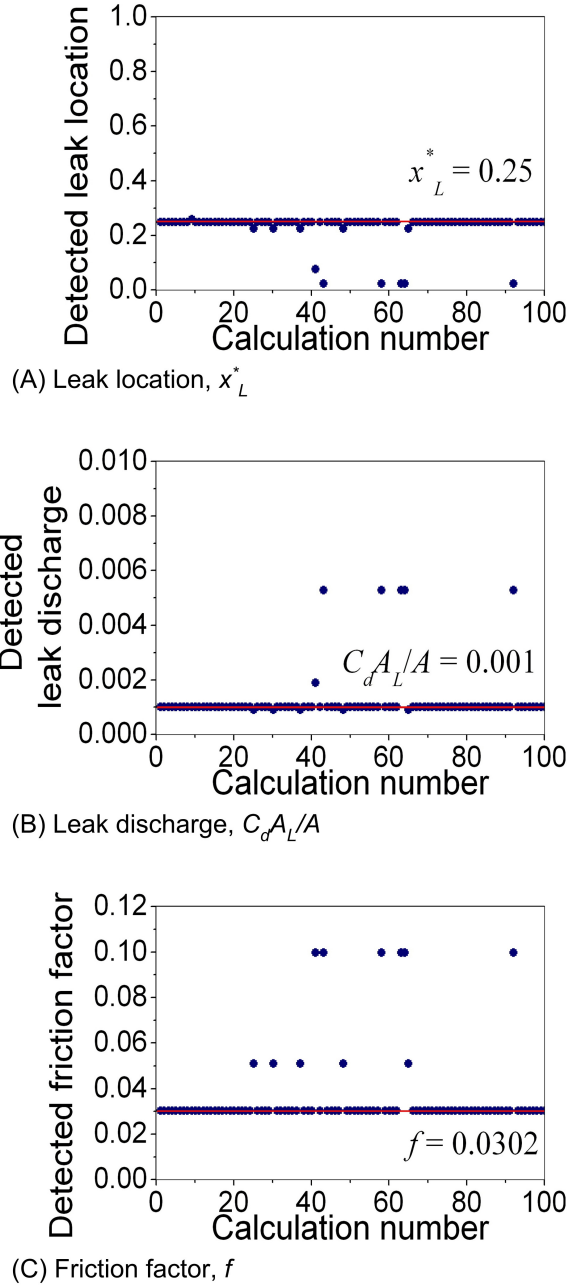
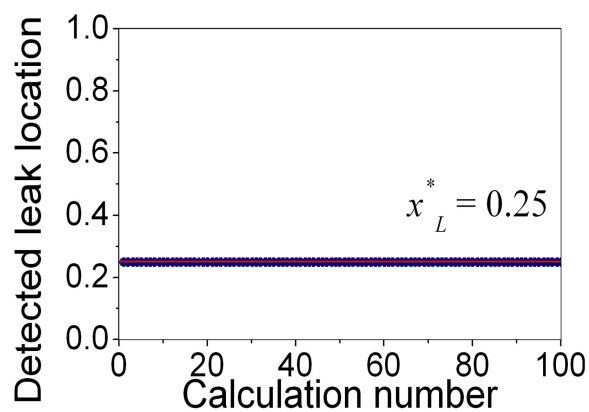
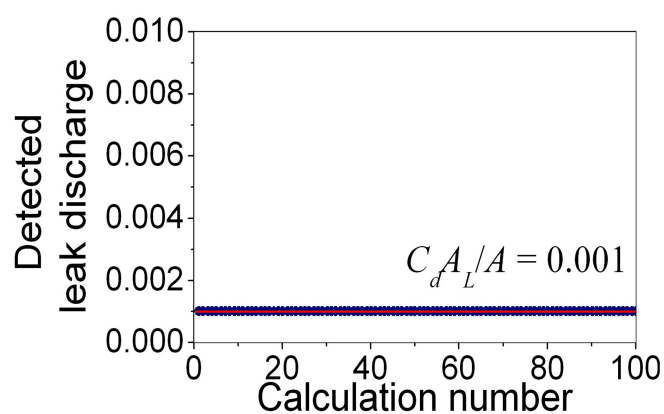


Fig. 4.5: Results of detecting leak with 3 parameters (x_L^* , $C_d A_L / A$, f); $x_L^* = 0.25$, $C_d A_L / A = 0.001$, $f = 0.0302$, $x_{L,mea}^* = 0.2$

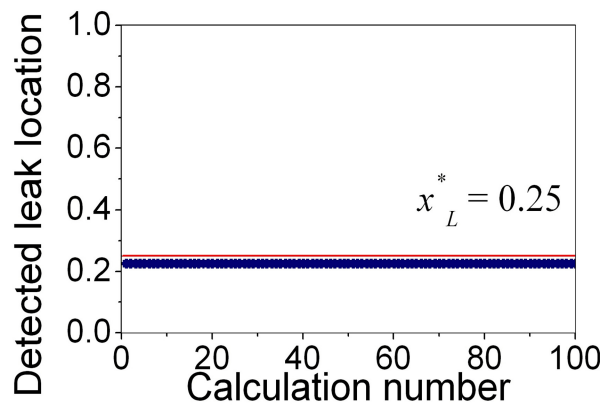


(A) Leak location, x_L^*

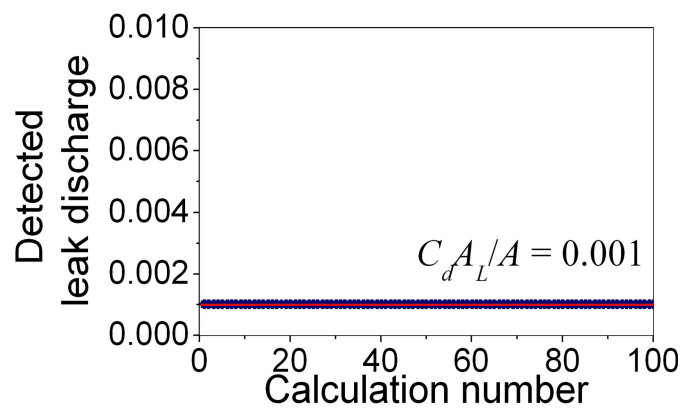


(B) Leak discharge, $C_d A_L / A$

Fig. 4.6: Results of detecting leak with 2 parameters (x_L^* , $C_d A_L / A$); $x_L^* = 0.25$, $C_d A_L / A = 0.001$, $f = 0.0302$, $x_{mea}^* = 0.2$

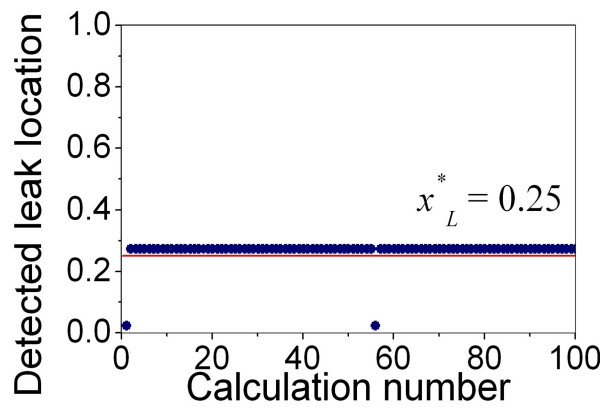


(A) Leak location, x_L^*

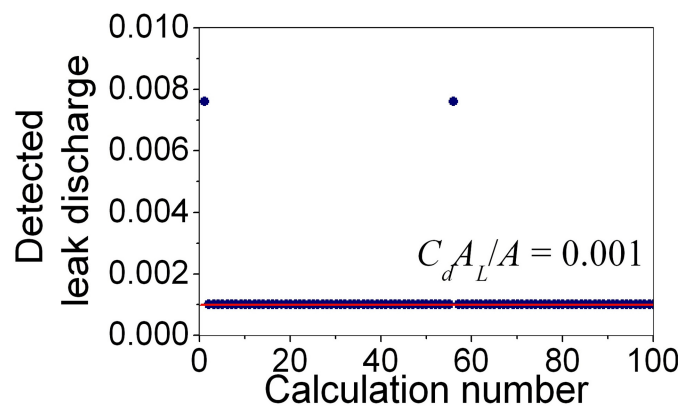


(B) Leak discharge, $C_d A_L / A$

Fig. 4.7: Results of detecting leak with 10 % larger friction factor ($f = 0.0332$); $x_L^* = 0.25$, $C_d A_L / A = 0.001$, $f = 0.0302$, $x_{mea}^* = 0.2$



(A) Leak location, x_L^*



(B) Leak discharge, $C_d A_L / A$

Fig. 4.8: Results of detecting leak with 10 % smaller friction factor ($f = 0.0272$); $x_L^* = 0.25$, $C_d A_L / A = 0.001$, $f = 0.0302$, $x_{mea}^* = 0.2$

4.1.4 圧力測定位置による影響

圧力測定を管路中の2箇所で行うことができる場合は、その二つの点での圧力を利用して漏れの探索ができる。圧力の測定位置を2箇所にした場合の適応度として、2点の測定圧力値 (H^{m1} 、 H^{m2}) と計算により求められた圧力値 (H^{c1} 、 H^{c2}) の差をとり、各節点での差の二乗の和とした。このとき、 H^1 と H^2 はいずれも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。

$$Ev = \sum_{i=1}^{end} \{ (H_i^{m1} - H_i^{c1})^2 + (H_i^{m2} - H_i^{c2})^2 \} \quad (4.3)$$

表(4.2)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。そのかわり、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。供試管路が簡単な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、複雑なシステムや管摩擦係数が途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。

Table 4.2: Percents of detecting leak location less than 5 % difference with 2 pressures; $C_d A_L/A = 0.001$ 、 $f = 0.0302$

x_{mea}^* \backslash 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

4.2 漏れが2箇所の場合

4.2.1 供試管路

図(4.9)は、漏れが2箇所の場合に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、水が供給されている。管路の長さ L は $1,000m$ で、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。下流のバルブを通過する初期流量 Q_0 は $2.0\ell/s$ で、この時のレイノルズ数は $11,160$ である。音速 a は $1,300m/s$ 、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する。これに対して、GAのパラメータは、2箇所の漏れの位置 $(x_L^*)_1$ 、 $(x_L^*)_2$ 、漏れの大きさ $(C_d A_L/A)_1$ 、 $(C_d A_L/A)_2$ で構成した。各パラメータである漏れの位置と漏れの大きさの範囲及び刻みは、漏れが1箇所の場合と同一である。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。

表(4.3)には、対象とする実際の漏れの位置と漏れの大きさを示す。

Table 4.3: The leak conditions; $x_{mea}^* = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$

Number of leaks	True leak condition
2	$(x_L^*)_1 = 0.3, (C_d A_L/A)_1 = 0.0004$ $(x_L^*)_2 = 0.7, (C_d A_L/A)_2 = 0.0006$

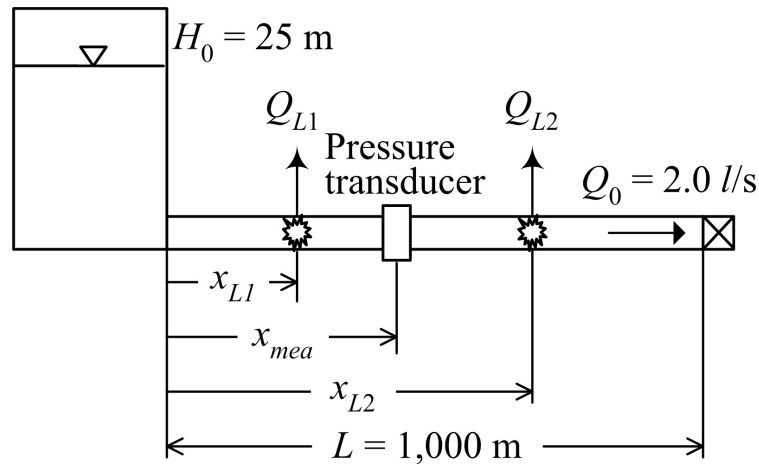
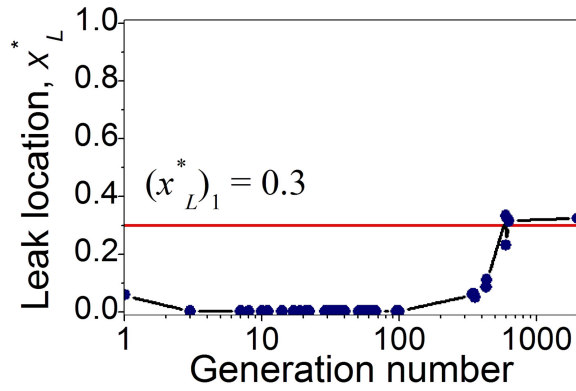


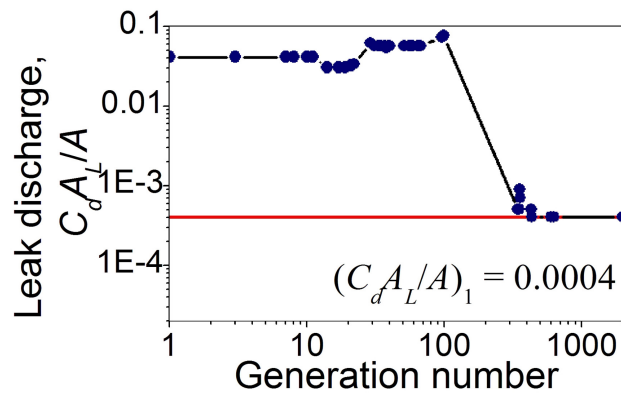
Fig. 4.9: Pipeline connecting an upstream reservoir and downstream valve with 2 leaks; $L = 1,000$ m, $H_0 = 25$ m, $Q_0 = 2.0$ l/s

4.2.2 漏れの探索結果

管路中の漏れが2箇所、圧力測定は1箇所の際の結果について検討する。実際の漏れの位置と大きさは表(4.3)に示される2箇所である。GAのパラメータは、2箇所の漏れの位置 $(x_L^*)_1$ 、 $(x_L^*)_2$ と漏れの大きさ $(C_d A_L / A)_1$ 、 $(C_d A_L / A)_2$ の四つにした。GAの初期集団数は120、最大世代数は2000、四つの突然変異(一様、非一様、多非一様、境界突然変異)全部を世代ごとにそれぞれ3回、三つの交叉(単純、算術、ヒューリスティック交叉)も全部3回ずつの条件で、最適化を行った。この時、dell-8400 (Pentium 4 CPU、3.4 GHz、2G RAM)での平均計算時間は39分51秒であった。図(4.10)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流量をほぼ完全に探索できた。



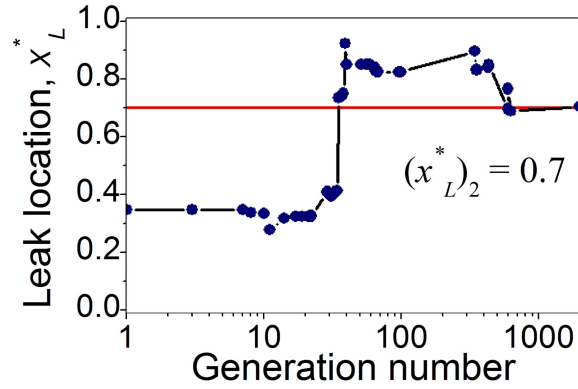
(A-1) Calculated leak location $(x_L^*)_1$



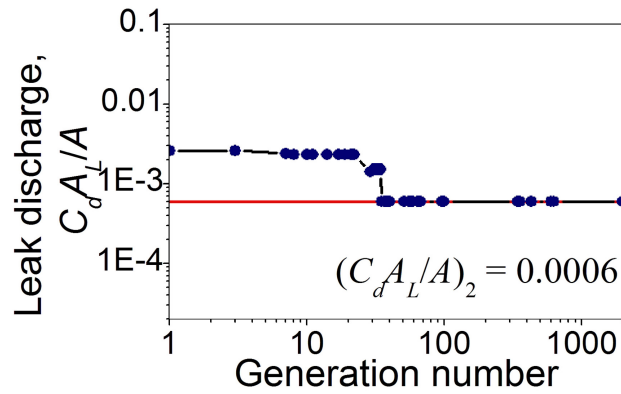
(B-1) Calculated leak discharge $(C_d A_L / A)_1$

(1) Leak #1

Fig. 4.10: Results of leak detection with 2 leaks; $x_{mea}^* = 0.8$



(A-2) Calculated leak location $(x_L^*)_2$



(B-2) Calculated leak discharge $(C_d A_L / A)_2$

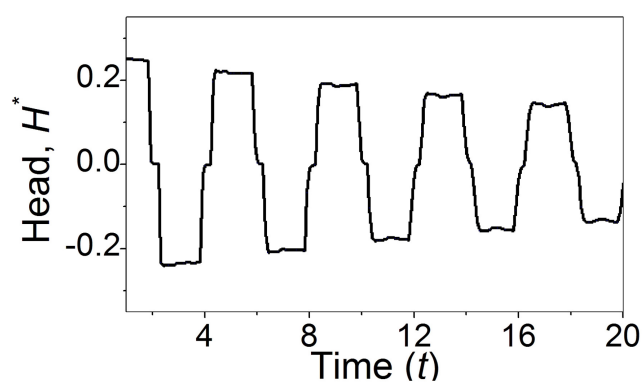
(2) Leak #2

Fig. 4.10: Results of leak detection with 2 leaks; $x_{mea}^* = 0.8$

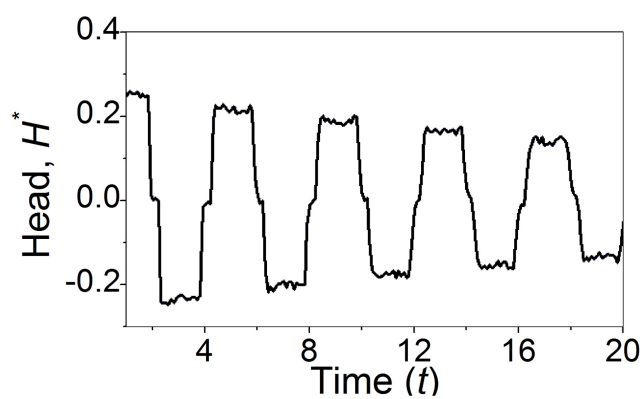
4.2.3 ノイズの含まれた測定圧力の影響

本研究では、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。実際には、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ある。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、0.5 m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図(4.11)である。 H^m にノイズが含まれる場合にも、漏れの位置、漏れ流量、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2000、突然変異及び交叉はそれぞれ3回行われた。各ノイズの加わったときの探索の結果を表(4.4)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、0.25 m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。図(4.12)から図(4.14)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。

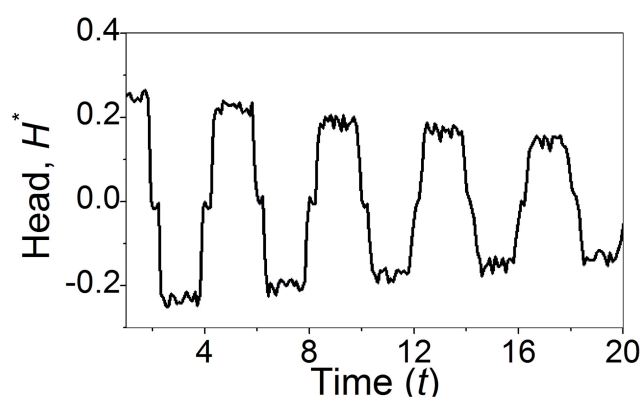


(A) Without noise

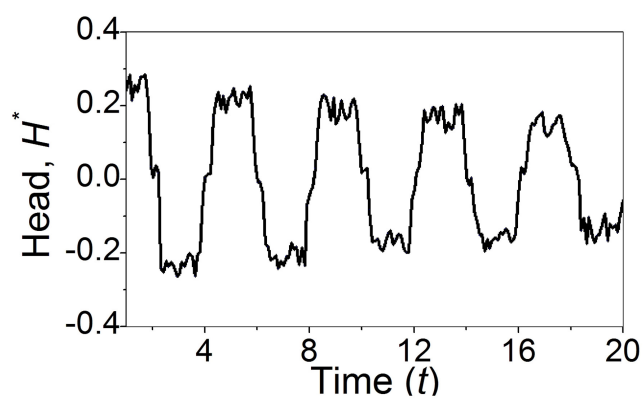


(B) Noise with 0.125 m standard deviation

Fig. 4.11: Pressure histories without and with noises; $x_{mea}^* = 0.8$

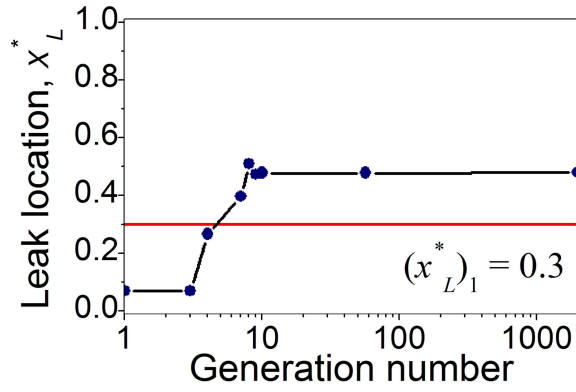


(C) Noise with 0.25 m standard deviation

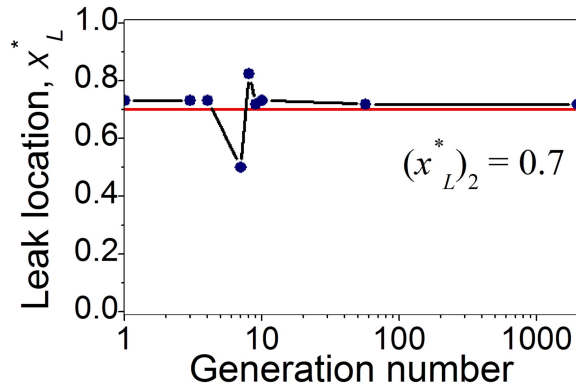


(D) Noise with 0.5 m standard deviation

Fig. 4.11: Pressure histories without and with noises; $x_{mea}^* = 0.8$

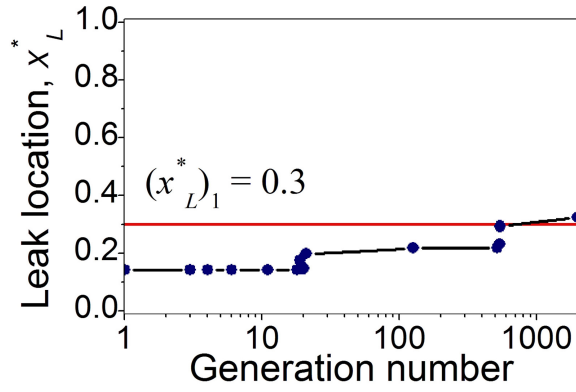


(A) Detected leak location, $(x_L)_1$

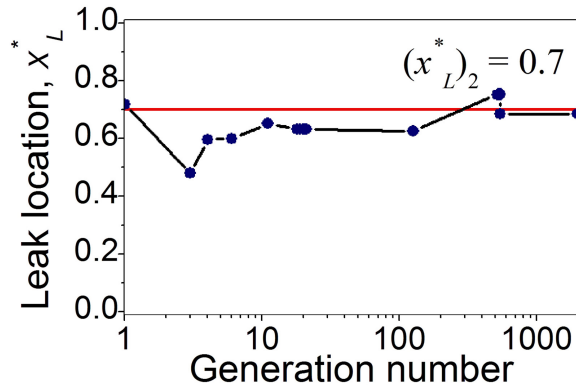


(A) Detected leak location, $(x_L)_2$

Fig. 4.12: Detected leak locations with noisy data of 0.125 m standard deviation; $(x_L^*)_1 = 0.3$ 、 $(x_L^*)_2 = 0.7$ 、 $(C_d A_L/A)_1 = 0.0004$ 、 $(C_d A_L/A)_2 = 0.0006$ 、 $x_{mea}^* = 0.4$

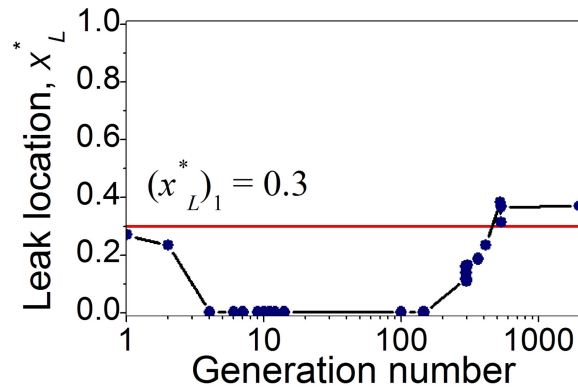


(A) Detected leak location, $(x_L)_1$

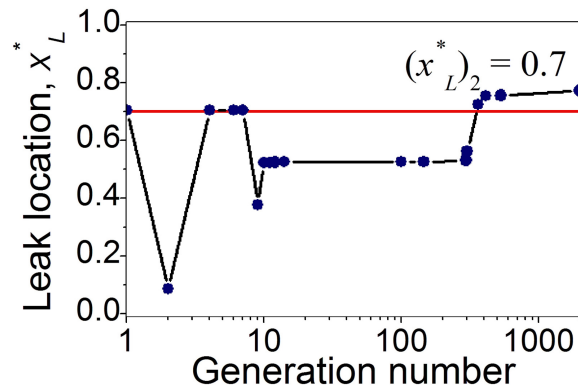


(A) Detected leak location, $(x_L)_2$

Fig. 4.13: Detected leak locations with noisy data of 0.25 m standard deviation; $(x_L^*)_1 = 0.3$ 、 $(x_L^*)_2 = 0.7$ 、 $(C_d A_L/A)_1 = 0.0004$ 、 $(C_d A_L/A)_2 = 0.0006$ 、 $x_{mea}^* = 0.4$



(A) Detected leak location, $(x_L)_1$



(A) Detected leak location, $(x_L)_2$

Fig. 4.14: Detected leak locations with noisy data of $0.5 m$ standard deviation; $(x_L^*)_1 = 0.3$ 、 $(x_L^*)_2 = 0.7$ 、 $(C_d A_L/A)_1 = 0.0004$ 、 $(C_d A_L/A)_2 = 0.0006$ 、 $x_{mea}^* = 0.4$

Table 4.4: The results of leak detection with pressure data of standard deviations; $(x_L^*)_1 = 0.3$, $(x_L^*)_2 = 0.7$, $(C_d A_L/A)_1 = 0.0004$, $(C_d A_L/A)_2 = 0.0006$, $x_{mea}^* = 0.4$

Parameters	Noise	0.125	0.25	0.5	No noise
	$(x_L^*)_1$		0.4789	0.3240	0.3693
$(x_L^*)_2$		0.7190	0.6847	0.7729	0.6878
$(C_d A_L/A)_1$		0.0008	0.0004	0.0006	0.0004
$(C_d A_L/A)_2$		0.0002	0.0006	0.0006	0.0006
computing time(s)		724	894	1690	1407

4.3 漏れ数が仮定と異なる場合

Pudar や Liggett らが提案した非定常逆解法を利用した給水システムの漏れを探す方法 [13, 21–24] 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た。もしも、漏れが節点ではなく節点間の管路で発生する場合は、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。その代わりに、計算の事前に何箇所か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。

4.1 節までは、1 箇所かの漏れに対して 1 箇所かの漏れを仮定して計算が行われた。4.2 節では、漏れが 2 箇所にあると仮定し、2 箇所かの漏れを探索した。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 箇所かの漏れを仮定して、1 箇所かのみの漏れを探索する場合について検討

Table 4.5: The leak conditions; $x_{mea}^* = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$

Number of leaks	True leak condition
1	$x_L^* = 0.25, 0.5, 0.75$ $C_d A_L / A = 0.001$

する。

表(4.5)の1箇所の漏れに対して、GA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。表(4.7)と表(4.6)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%以内の範囲で探した回数を示したものである。

表(4.7)は1箇所の漏れに対して1箇所の漏れを仮定した場合の結果で、表(4.6)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

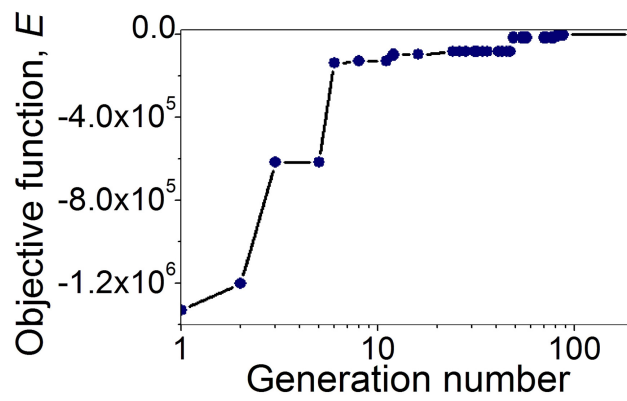
過程を示したのが図(4.15)である。この結果から、実際には1箇所の漏れの場合に対して、2箇所の漏れを仮定して計算しても、計算の精度と計算速度は落ちるものの、探索可能なことが確認された。

Table 4.6: Percents of detecting leak location less than 5 % difference; under assumption of 2 leak points

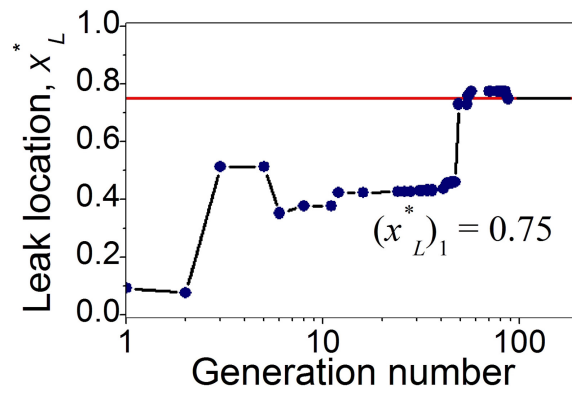
x_{mea}^* \ x_L^*	0.25	0.5	0.75	Mean
0.2	98	61	98	85.7
0.4	94	66	85	81.7
0.6	81	52	51	61.3
0.8	89	55	42	62.0
Mean	90.5	58.5	69.0	72.7

Table 4.7: Percents of detecting leak location less than 5 % difference; under assumption of 1 leak point

x_{mea}^* \ 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

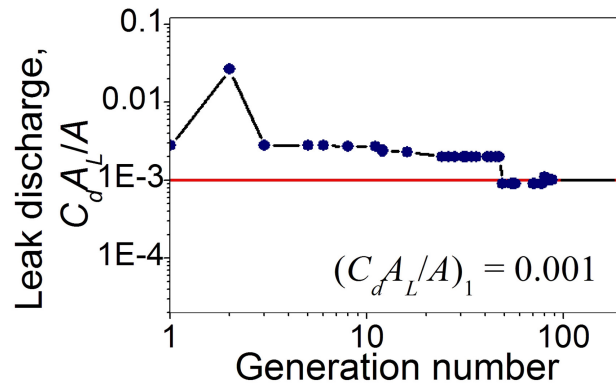


(A) Objective function (E)

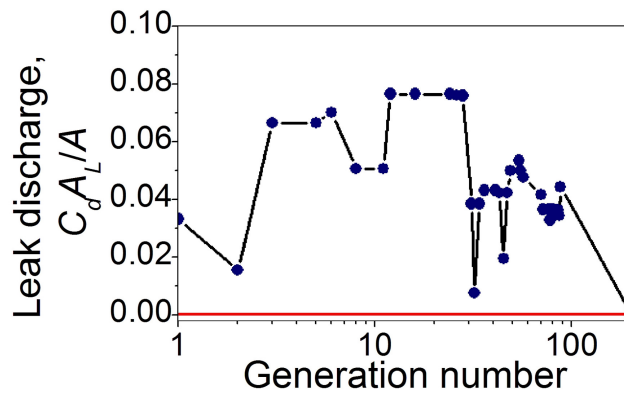


(B) Calculated leak location $(x_L^*)_1$

Fig. 4.15: Process of leak detection under assumption of 2 leak points for 1 leak point; $x_L^* = 0.75$, $C_d A_L / A = 0.001$, $x_{mea}^* = 0.6$



(C) Calculated leak discharge $(C_d A_L / A)_1$



(D) Calculated leak discharge $(C_d A_L / A)_2$

Fig. 4.15: Process of leak detection under assumption of 2 leak points for 1 leak point; $x_L^* = 0.75$, $C_d A_L / A = 0.001$, $x_{mea}^* = 0.6$

第5章 結論

5.1 本研究で得られた結果

本研究では、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、及び管路の管摩擦係数を非定常逆解法と GA 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探索できた。
- (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) 2 箇所の圧力データを利用することによって 1 箇所の圧力データを利用する場合より探索の精度が上がる。

(6) 漏れの探索のために使われた圧力値にノイズが含まれる場合にも、漏れの探索結果はノイズがない場合と大きな差はなかった。

(7) 漏れの数进行特定できない場合に、漏れが2箇所存在すると仮定することで、実際の漏れが1箇所の場合も探索できた。

5.2 問題点と将来への展望

原水を処理し、飲用水を必要な場所に必要量を輸送するためには、様々な努力や資金が必要である。飲用水の管路での漏れは、経済的損失、周囲に与える悪影響、公衆衛生の面でも予防しなければならない問題である。また、管路で輸送されるのが石油や天然ガスなどの貴重な自然資源である場合にも、漏れの予防は重要である。

このような漏れの対策としては、管路を健全に管理する、管圧を可能な限り低圧で運用するなどの管理面での方法もあるが、漏れを積極的に探索することも重要である。今まで、多様な漏れの検出方法が開発されて来たが、今なお、単純、かつ信頼できる探索方法の確立が期待されている。本研究では、提案した遺伝的アルゴリズム及び非定常逆解法を利用した漏れの探索法によって、簡単に管路中の複数の漏れを探索できる可能性を示した。最近の大規模な浄水システムでは、実時間で重要な管理地点の圧力や流量データを測定管理している。管路の内径などの基本情報、そして非定常流れを起こす場所に関する情報を把握しておけば非定常流れの計算はできる。この計算で求められた圧力を、測定管理圧力変動と比較して本研究の非定常逆解法を利用して漏れの探索ができる。管路中で流量調節のためのバルブ操作、ポンプの始動、停止などによって非定常流れが発生するたびに漏れの探索を自動的に行うことも可能になると考えられる。

本研究では、単純管路を対象としたが、複雑な管路網にも応用が期待

され、今後の課題である。

謝辞

まず、今までの研究の機会を与えて下さった日本政府や韓国水資源公社に感謝します。本研究遂行にあたり始終ご指導を受け、研究のみならずさまざま面で私を一人の工学者として育てて下さった塚本 寛教授に深甚なる謝意を表します。

本論文の校正や検討を頂きました九州工業大学工学部秋山 壽一郎教授、生命体工学研究科西尾 一政教授、玉川 雅章准教授、宮崎 康次准教授に対し深く感謝いたします。

実験の手伝いをしてくれた研究室の後輩にも感謝します。そして、私の留学のために、一緒に苦労をした家族にも感謝します。

参考文献

- [1] Vitkovsky, J. P., Lee, P. J., Stephens, M. L., Lambert, M. F., and Simpson, A. R., Leak and blockage detection in pipelines via an impulse response method, *Pumps, Electromechanical Devices and Systems Applied to Urban Water Management*, Vol. 1, pp. 423-430 (2003)
- [2] Caputo, A. C., and Pelagagge, P. M., Using neural networks to monitor piping systems, *Process safety progress*, Vol. 22, No. 2, pp. 119- 127 (2003)
- [3] Papadakis, G. A., Major hazard pipelines: A comparative study of on-shore transmission accidents, *Journal of loss prevention in the process industries*, Vol. 12, No. 1, pp. 91-107 (1999)
- [4] Papadakis, G. A., EU initiative on the control of major accident hazards arising from pipelines, *Journal of loss prevention in the process industries*, Vol. 12, No. 1, pp. 85-90 (1999)
- [5] Gao, X., Fan, H., Huang, T., Wang, X., Bao, J., Li, X., Huang, W., and Zhang, W., Natural gas pipeline leak detection based on NIR diode laser absorption spectroscopy, *Spectrochimica Acta Part A* 65, pp. 133-138 (2006)

- [6] Cheong, L. C. , Unaccounted-for Water and the Economics of Leak Detection , Proceedings of the International Water Supply Congress , Copenhagen, Water Supply, Vol.9, pp. IR 1-1 to 1-6 (1991)
- [7] American Water Works Association, Leaks in Water Distribution Systems - A Technical/Economic Overview, Denver (1987)
- [8] 2005 上水道統計, Ministry of Environment Republic of Korea, (2006)
- [9] Human development report 2006 - Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis, United Nations Development Programme (2006)
- [10] Belsito, S., Lombardi, P., Andreussi, P., and Banerjee, S., Leak detection in liquefied gas pipelines by artificialneural networks, AIChE Journal, Vol. 44, No. 12, pp. 2675-2688 (1998)
- [11] Simpson, A. R., and Vitkovsky, J. P., A Review of Pipe Calibration and Leak Detection Methodologies for Water Distribution Networks, Proceedings of the 17th Federal Convention, Australian Water and Wastewater Association, Australia, Vol.1, pp. 680-687 (1997)
- [12] Beck, S. B. M., Curren, M. D., Sims, N. D., and Stanway, R., Pipeline network features and leak detection by cross-correlation analysis of reflected waves, Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 131, No. 8, pp. 715-723 (2005)
- [13] Pudar, R. S., and Liggett, J. A., Leaks in pipe networks, Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 118, No. 7, pp. 1031-1046 (1992)

- [14] Ferrante, M., and Brunone, B., Pipe system diagnosis and leak detection by unsteady-state tests: 1. Harmonic analysis, *Advanced in water resources*, Vol. 26, pp. 95-106 (2003)
- [15] Nicholas, R. E., Leak detection on pipeline in unsteady flow, 1990 winter annual meeting of ASME, Forum on unsteady flow, FED-Vol. 102, New York, pp. 23-25 (1990)
- [16] Liou, C. P., and Tian, J., Leak detection-transient flow simulation approach, *Journal of Energy Resources Technology*, Vol. 117, pp. 243-248 (1995)
- [17] Jösön, L., and Larson, M., Leak detection through hydraulic transient analysis, *Pipeline systems*, B. Coulbeck and E. Evans, eds., Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, pp. 273-286 (1992)
- [18] Lee, P. J., Vitkovsky, J. P., Lambert, M. F., Simpson, A. R., and Liggett, J., Frequency domain analysis for detecting pipeline leaks, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 131, No. 7, pp. 596-604 (2005)
- [19] Mpsesha, W., Gassman, S. L., and Chaudhry, M. H., Leak detection in pipes by frequency response method, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 127, No. 2, pp. 134-147 (2001)
- [20] Wang, X. J., Lambert, M. F., Simpson, A. R., Liggett, J., and Vitkovsky, J. P., Leak detection in pipeline systems using the damping of fluid transients, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 128, No. 7, pp. 697-711 (2002)

- [21] Liggett, J. A., and Chen, L.-C., Inverse Transient Analysis In Pipe Networks, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 120, No. 8, pp. 934-955 (1994)
- [22] Vitkovsky, J. P., Simpson, A., and Lambert, M., Leak detection and calibration using transients and genetic algorithms, *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, Vol. 126, No.4, pp. 262-265 (2000)
- [23] Nash, G. A., and Karney, B. W., Efficient Inverse Transient Analysis in Series Pipe Systems, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 125, No. 7, pp. 761-764 (1999)
- [24] Kapelan, Z. S., Savic, D. A., and Walters, G. A., A hybrid inverse transient model for leakage detection and roughness calibration in pipe networks, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 41, No. 5, pp. 481-492 (2004)
- [25] Kim, S. H., Extensive development of leak detection algorithm by impulse response method, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 131, No. 3, pp. 201-208 (2005)
- [26] Savic, D., Lambert, A., and Kapelan, Z., Water losses management and leakage detection techniques for water distribution system, *Water & Sewerage Journal*, Vol. 2, pp. 25-27 (2005)
- [27] Wylie, E. B., and Streeter, L. V., *Fluid transients in systems*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ (1993)
- [28] Larock, B. E, Jeppson, R. W., and Watters, G. Z., *Hydraulics of pipelines systems*, CRC Press, (2000)

- [29] Streeter, V. L., and Wylie, E. B., Fluid Mechanics, 8th ed., McGraw-Hill, New York, (1985)
- [30] Wylie, E. B., and Streeter, L. V., Fluid transients, FEB press, Ann Arbor, Michigan (1983)
- [31] Liou, C. P., Pipeline leak detection by impulse response extraction, Journal of Fluids Engineering, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 120, No. 4, pp. 833-838 (1998)
- [32] Streeter, V. L., and Lai, C., Water hammer analysis including fluid friction, Journal of Hydraulics Division, American Society of Civil Engineers, Vol. 88, No. HY3, pp. 79-112 (1962)
- [33] Wylie, E. B., Advances in use of MOC in unsteady pipeline flow, Proceedings of 4th International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, Bath, England, pp. 27-37 (1983)
- [34] Vardy, A. E., Unsteady flows: fact and friction, Proceedings of 3rd International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, Canterbury, England, pp. 15-26 (1980)
- [35] Brunone, B., Golia, U. M., and Gerco, M., Effects of two-dimensionality on pipe transients modeling, Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 121, No. 12, pp. 906-912 (1995)
- [36] Zielke, W., Frequency dependent friction in transient pipe flow, Journal of Basic Engineering, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 90, pp. 109-115 (1968)

- [37] Wood, D. J., and Funk, J. E., A boundary-layer theory for transient viscous losses in turbulent flow, *Journal of Basic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, Vol. 92, pp. 865-873 (1970)
- [38] Shuy, E. B., and Apelt, C. J., Friction effects in unsteady pipe flows, *Proceedings of 4th International Conference on Pressure Surges*, British Hydromechanics Research Group, Bath, England, pp. 147-164 (1983)
- [39] Jelev, I., The damping of flow and pressure oscillations in water hammer analysis, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 27, No. 1, pp. 91-114 (1989)
- [40] Vardy, A. E., and Hwang, K. L., A characteristic model of transient friction in pipes, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 29, No. 5, pp. 669-684 (1991)
- [41] Silva-Araya, W. F., and Chaudhry, M. H., Energy dissipation in transient flow, *Proceedings of Fluid Transients*, New York, USA, Vol. 291, pp. 51-55 (1994)
- [42] Vardy, A. E., and Brown, J. M. B., Transient, turbulent, smooth pipe friction, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 435-456 (1995)
- [43] Pezzinga, G., Quasi-2D model for unsteady flow in pipe networks, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 125, No. 7, pp. 676-685 (1999)
- [44] Axworthy, D. H., Ghidaoui, M. S., and McInnis, D. A., Extended thermodynamics derivation of energy dissipation in unsteady pipe flow, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 126, No. 4, pp. 276-287 (2000)

- [45] Brunone, B., Karney, B. W., Mecarelli, M., and Ferrante, M., Velocity profiles and unsteady pipe friction in transient flow, *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, Vol. 126, No.4, pp. 236-244 (2000)
- [46] Bergant, A., Simpson, A. R., and Vitkovsky, J., Developments in unsteady pipe flow friction modelling, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 3, pp. 249-257 (2001)
- [47] Brunone, B., Golia, U. M., and Greco, M., Some remarks on the momentum equations for fast transients, *International Meeting on Hydraulic Transients with Column Separation, 9th Round Table*, International Association of Hydraulic Research, Valencia, Spain, pp. 140-148 (1991)
- [48] Vardy, A. E., Brown, and J. M. B., On turbulent, unsteady, smooth-pipe flow, *Proceedings of International Conference on Pressure Surge and Fluid Transients*, British Hydromechanics Research Group, Harrogate, England, pp. 289-311 (1996)
- [49] Brunone, B., and Ferrante, M., Detecting leaks in pressurised pipes by means of transients, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 39, No. 5, pp. 539-547 (2001)
- [50] Brunone, B., Transient test-based technique for leak detection in outfall pipes, *Journal of Water Resources Planning and Management*, American Society of Civil Engineers, Vol. 125, No.5, pp. 302-306 (1999)
- [51] Mpesha, W., Chaudhry, M. H., and Gassman, S. L., Leak detection in pipes by frequency response method using a step excitation, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 40, No. 1, pp. 55-62 (2002)

- [52] Press, W. H., Teukolsky, S. A., Vetterling, W. T., and Flannery, B. P., Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press, pp. 362-365 (1992)
- [53] 高桑 哲男, 配水管網の解析と設計, 森北出版, pp. 38-46 (1978)
- [54] Nakamura, S., Numerical analysis and graphic visualization with MATLAB, Prentice Hall, NJ, pp. 279-294 (2002)
- [55] Covas, D., and Ramos, H., Hydraulic transients used for leakage detection in water distribution systems, British Hydromechanics Research Group 2001 Water Pipeline Systems, pp. 227-241 (2001)
- [56] Holland, J., Adaptation in natural and artificial systems, The University of Michigan Press, Ann Arbor, (1975)
- [57] Mitchell, M., 遺伝的アルゴリズムの方法, 東京電気大学出版局, (1997)
- [58] Michalewicz, Z., Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs, AI Series. Springer-Verlag, New York (1994)
- [59] The Genetic Algorithm Optimization Toolbox(GAOT) for Matlab 5, Jun. 1998, NC state university, 23 Oct. 2006
- [60] Janikow, C. Z., and Michalewicz, Z., An experimental comparison of binary and floating point representations in genetic algorithm, Proceedings of the 4th International Conference on Genetic Algorithm (1991)
- [61] Joines, J., and Houck, C. On the use of non-stationary penalty functions to solve constrained optimization problems with genetic algorithm, In 1994 IEEE International Symposium Evolutionary Computation, Orlando, FL, pp. 579-584 (1994)

- [62] Abdi, H., Least squares, In Lewis-Beck, M., Bryman, A., and Tuting, T., Encyclopedia for research methods for the social sciences, Thousand Oaks (CA): Sage. pp. 792-795 (2003)
- [63] Watters, G. Z., Analysis and control of unsteady flow in pipelines, Butterworths, MA, pp. 1-4 (1984)
- [64] Frank, O., Die grundform des arteriellen pulses, Erste Abhandlung, Mathematische Analyses, Zeitschrift für Biologie, Vol. 37, pp. 483-526 (1889)
- [65] Fung, Y. C., Biomechanics: circulation, Springer-Verlag, NY, pp. 23-27 (1996)
- [66] Grundy, A. K., and Fox, J. A., The effect of compressible pipe-liners on pressure transient generation, Proceedings of the 3rd International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, Cranfield, U.K., pp. 241-260 (1980)
- [67] Ghilardi, P., and Paoletti, A., Additional viscoelastic pipes as pressure surges suppressors, Proceedings of the 5th International Conference on Pressure Surges, British Hydromechanics Research Association, Cranfield, U.K., pp. 113-121 (1986)
- [68] Ferry, J. D., Viscoelastic properties of polymers, John Wiley and Sons, Chichester, U.K., pp. 1-3 (1980)
- [69] Pezzinga, G., and Scandura, P., Unsteady flow in installations with polymeric additional pipe, Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, Vol. 121, No. 11, pp. 802-811 (1995)

- [70] Pezzinga, G., Unsteady flow in hydraulic network with polymeric additional pipes, *Journal of Hydraulic Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol. 128, No. 2, pp. 238-244 (2002)
- [71] EJMA Standard (Standard of the Expansion Joint Manufacturers Associations), 5th Edition, White Plains, NY (1980)

付録

A.1 軟らかい管を含む管路の過渡現象

A.2 定常逆解法

A.1 軟らかい管を含む管路の過渡現象

非定常流れが工業分野で重要な問題になるのは、定常流れの場合よりかなり大きい圧力、振動、キャビテーションを起こす危険性があるからである [63]。このような過渡現象は、停電、バルブの操作などによって流れが急変され、その運動量の変化が圧力変化となって管路の上下流に伝播されるものである。多様な方法でこの過渡流れによる圧力上昇が調節されてきたが、現実的な適用が難しく、コストがかかる場合も多い。

一方、人体内の心臓血管系では、心臓内での激しい血圧の変動が軟らかい大動脈を通過することによって、平均血圧は高くともその変動は激しくない安定した変動に変わることが知られている [64,65]。この生体内のメカニズムを利用し、一般管路での非定常流れによる高い圧力波を緩和させる方法が模索されている。Grundy と Fox は、管路中に弾性率が高い管を挿入することで非定常振動を緩和しうる可能性を示した [66]。Ghilardi と Paoletti は、粘弾性挙動を持つ管を管路の中に挿入して非定常流れの振動や圧力上昇を緩和した [67]。ここでは、軟らかい管を硬い主管の一部に入れ、その長さや挿入位置が非定常流れに及ぼす影響を明らかにする。

A.1.1 実験装置

実験装置は、図 (A.1) のように、水を供給するタンク、遠心ポンプ、圧力センサ、流量計、電磁弁、流量調節弁の順で水供給タンクに戻る閉ループシステムである。主管は内径 20 mm、肉厚 0.3 mm のペローズ管で、そ

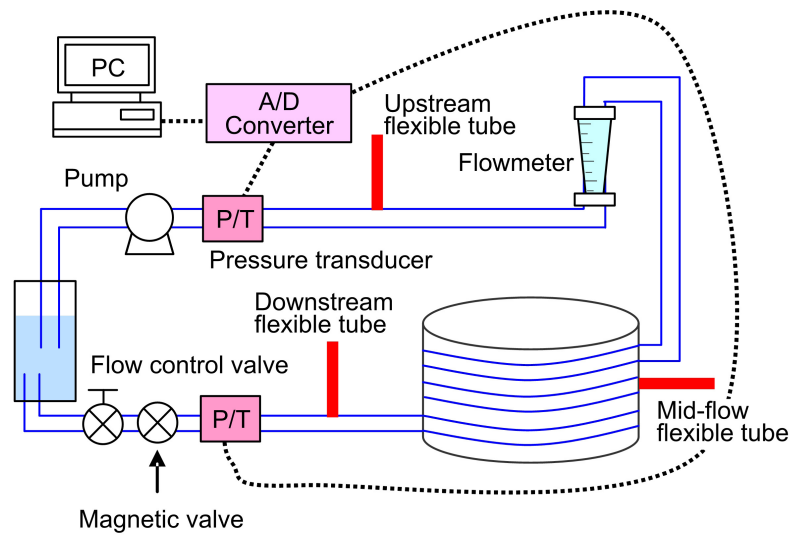


Fig. A.1: Experimental apparatus

の材質はステンレス鋼 (SUS 316L) である。実験装置をコンパクトにするために自由に曲げられる管を選択した。ポンプの設計運転条件は、流量 $21 \ell/min$ 、全揚程 $16 m$ である。

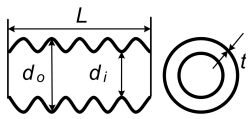
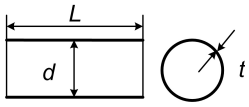
ポンプの吐出し側には、一定な圧力を維持するためにタンクが設置され、ポンプからタンクへ送出された水がタンクを通じて配管に供給される。流量の調節は下流側のボールバルブで行い、ガラス管式の面積流量計で流量を確認する。圧力センサは 0 から $1 MPa$ の測定範囲を有したもので、上流及び下流に設置された。圧力信号のサンプリングは $1 kHz$ で行われ、A/D 変換器を通じ、コンピュータに伝達される。非定常流れを起こすのは下流側に設置された口径 $20 mm$ の電磁弁で、その遮断時間は 0.3 秒である。

主管及び軟らかい管の特性を表 (A.1) に示す。主管には容易に曲げられるペローズ管を選び、実験装置を小型化した。主管の材質はSUS 316Lで、そのヤング率 (E) 及びポアソン比はそれぞれ 193 MPa 、 0.26 であった。主管に挿入される軟らかい管は E とポアソン比が 69.8 MPa 、 0.5 であった。

A.1.2 実験方法

実験では、軟らかい管の長さや軟らかい管の挿入位置が非定常流れの圧力変動に及ぼす影響を調べた。全長 1 、 2 m の軟らかい管をそれぞれ管路の上流、中流、下流に挿入した場合と軟らかい管がない場合の圧力変動を比較した。挿入した位置はそれぞれタンクから上流が 1.5 m 、中流が 36 m 、下流が 82 m の位置である。また、流量については、 6.61 、 7.72 、 8.83 、 10.28 、 12.25 l/min 、及び流量調節バルブ全開の場合の実験を行った。

Table A.1: Specifications of main pipe and flexible tube

	Main pipe	Flexible pipe
Diameter d_o	24	19
$d(mm)$ d_i	19.8	
Thickness $t(mm)$	0.3	2
Length $L(m)$	86	1, 2
Young's modulus $E(GPa)$	193	63×10^{-3}
Schematics		

A.1.3 非定常流れ解析

(a) 粘弾性モデル

完全流体は、圧力が発生すると流体の速度変動と粘性による抵抗が発生し、圧力が解除されても元の状態に戻れない。一方、完全個体は、圧力がかかると弾性が発生し、圧力が解除されると元の状態に復帰する。液体のように流れる性質(粘性)と固体のように弾む性質(弾性)を併せ持っているものが粘弾性体である [68]。

管壁の変形 (ε) を瞬間変形要素 (ε^i) と遅延変形要素 (ε^r) ので表せば、

$$\varepsilon = \varepsilon^i + \varepsilon^r \quad (\text{A.1})$$

になる。図 (A.2) のように、瞬間変形要素 (ε^i) をばね成分 (E_0) で、遅延変形要素 (ε^r) はばね (E_1) とダンパー (η_1) の並列関係の Kelvin-Voigt 粘弾性モデルで表すことができる [69]。ここで、 E_0 : 管壁の瞬間弾性係数、 E_1 : 粘弾性モデルの遅延ばね係数、 η_1 : 粘弾性モデルの遅延減衰係数、である。このモデルでの瞬間変形要素 (ε^i) と遅延変形要素 (ε^r) は次のようになる。

$$\varepsilon^i = \frac{pr}{E_0 s} \quad (\text{A.2})$$

$$\frac{d\varepsilon^r}{dt} = \frac{1}{\tau_1} \left(\frac{pr}{E_1 s} - \varepsilon^r \right) \quad (\text{A.3})$$

ここで、遅延時間 τ_1 は $\tau_1 = \eta_1 / E_1$ である。

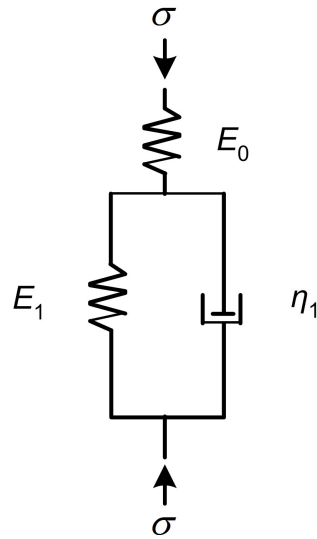


Fig. A.2: Kelvin-Voigt viscoelastic model

図 (A.2) のような線形粘弾性モデルでは、連続方程式だけに影響を与え、連続式 (2.23) は次のようになる [70]。

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{a^2}{gA} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{2a^2}{g} \left(\frac{\partial \varepsilon^r}{\partial t} + V \frac{\partial \varepsilon^r}{\partial x} \right) = 0 \quad (\text{A.4})$$

この連続式と運動方程式 (2.22) を用いた特性方程式は

$$\frac{dH}{dt} \pm \frac{a}{gA} \frac{dQ}{dt} + \frac{2a^2}{g} \frac{d\varepsilon^r}{dt} \pm \frac{afQ|Q|}{2gDA^2} = 0 \quad (\text{A.5})$$

になる。図 (A.2) では、 E_0 は瞬間変形率で、圧力の変動が圧力波になり上下流に伝わる音速と関係する。遅延変形要素 (ε^r) は E_1 と η_1 の並列関

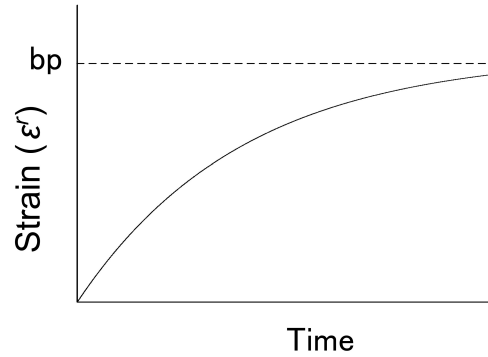


Fig. A.3: Strain curve as time

係から求められる。この並列の両端の応力を σ とすると、次の関係が成立する。

$$\sigma = E_1 \varepsilon^r + \eta_1 \frac{d\varepsilon^r}{dt} \quad (\text{A.6})$$

円筒の円周方向の応力は $\sigma_1 = pD/(2s)$ であるから式 (A.6) は

$$\frac{pD}{2s} = E_1 \varepsilon^r + \eta_1 \frac{d\varepsilon^r}{dt} = E_1 \varepsilon^r + \tau_1 E_1 \frac{d\varepsilon^r}{dt} \quad (\text{A.7})$$

になり、 $b = D/(2E_1 s)$ の関係を利用して整理すると次のようになる。

$$\frac{d\varepsilon^r}{dt} = \frac{1}{\tau_1 E_1} \left(\frac{pD}{2s} - E_1 \varepsilon^r \right) = \frac{1}{\tau_1} (bp - \varepsilon^r) \quad (\text{A.8})$$

式 (A.8) の微分方程式を解くと

$$\varepsilon^r(t) = bp(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}) \quad (\text{A.9})$$

になる。これは、図 (2.3) のように時間が経過するとともに bp に漸近することを表す。式 (A.5) と式 (A.9) を利用して特性曲線法で粘弾性特性を持つ軟らかい管の非定常流れを計算する。

式 (A.5) は特性曲線法によって離散化できる。図 (2.3) で、新しい時間の値 (P) は次のように求められる。

$$C^+; H_P = C_p - B_p - \frac{2a^2}{g}(\varepsilon_P - \varepsilon_B) \quad (\text{A.10})$$

$$C^-; H_P = C_m - B_m - \frac{2a^2}{g}(\varepsilon_P - \varepsilon_A) \quad (\text{A.11})$$

ここで、

$$C_p = H_B + \frac{a}{gA}Q_B, \quad B_p = \frac{a}{gA} + R|Q_B| \quad (\text{A.12})$$

$$C_m = H_C - \frac{a}{gA}Q_C, \quad B_m = \frac{a}{gA} + R|Q_C| \quad (\text{A.13})$$

式 (A.10) と式 (A.11) を用いて H_P と Q_P を求めることができる。

$$Q_P = \frac{C_p - C_m}{B_p + B_m} - \frac{1}{B_p + B_m} \frac{2\alpha^2}{g} (\varepsilon_C - \varepsilon_A) \quad (\text{A.14})$$

$$H_P = \frac{C_p B_m + C_m B_p}{B_p + B_m} - \frac{2\alpha^2}{g} \frac{B_m (\varepsilon_P - \varepsilon_A) + B_p (\varepsilon_P - \varepsilon_C)}{B_p + B_m} \quad (\text{A.15})$$

(b) ベローズ管内流の音速

主管には表(A.1)で示したようなベローズ管を使用した。円筒の縦歪及び円周歪 ε_1 及び ε_2 は次のようになる。

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \times (\sigma_1 - \nu\sigma_2) \quad (\text{A.16})$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{E} \times (\sigma_2 - \nu\sigma_1) \quad (\text{A.17})$$

図(A.4)は、ベローズ管の圧力に対する変形を示したもので、ばねのような形状から $\Delta L/L$ の歪も発生する。Hookの法則による伸張は $\Delta L = F/f_i$ で、ベローズ管のばね定数 f_i は EJMA (The Expansion Joint Manufacturers Association) の定義により次のようになる [71]。

$$f_i = 1.7 \frac{D_m E_b t_p^3 n}{\omega^3 C_f} \quad (\text{A.18})$$

ここで、 $D_m = (D_o + D_i)/2$: ベローズ管の平均管内径、 D_o : ベローズの山部の直径、 D_i : ベローズ谷部の直径、 E_b : ベローズ材質の弾性係数、 t_p : ベローズ管の厚さ、 n : ベローズ層数、 ω : ベローズ山の高さ、 C_f : U字型渦巻きに関する係数、である。この $\Delta L/L$ の歪を縦方向の歪に一致させると式(A.16)は次のようになる。

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{E} \times (\sigma_1 - \nu\sigma_2) + \Delta L/L \quad (\text{A.19})$$

管内での音速を計算する式(2.19)の中で、管の弾性に相当する部分は

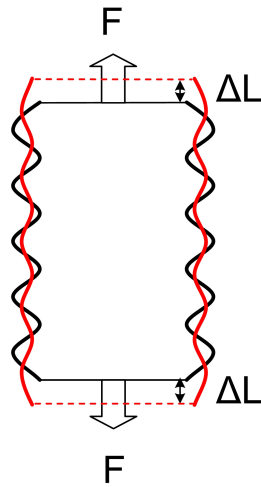


Fig. A.4: Deformation of bellows pipe

$\Delta A/(A \Delta p)$ である。この圧力に対する断面積の変形率から音速が決まる。管形状がベローズ管ではなく、一般の円筒型の管の場合には、縦応力と円周応力は

$$\sigma_1 = \frac{pD}{4s} \quad (\text{A.20})$$

$$\sigma_2 = \frac{pD}{2s} \quad (\text{A.21})$$

になる。今、縦方向が拘束条件であれば、縦歪 (ϵ_1) は0になり、式 (A.16) から次のような関係が成立する。

$$\sigma_1 = \nu \sigma_2 \quad (\text{A.22})$$

式 (A.22) を式 (A.17) に代入し、 $\Delta A/A = 2(\Delta \varepsilon_2 - \Delta \varepsilon_1)$ の関係を利用すると音速が求められる。

主管の形状がベローズではなく、一般の円管であるときには、音速の計算値は 1120 m/s となった。一方、同一の材質であっても、ベローズ管の場合には、形状に起因する縦歪の $\Delta L/L$ 成分によって、音速の計算値は 363 m/s になる。

A.1.4 軟らかい管の長さによる影響

図(A.5)では、管長1 m及び2 mの軟らかい管を下流に挿入した場合と主管だけの場合の非定常流れを比較した。軟らかい管の長さが長くなることで、過渡流れによる圧力上昇は小さくなり、圧力波の変動も緩やかになっている。軟らかい管がない主管だけの場合の最大圧力は0.448 MPaであったが、1 mの軟らかい管を挿入した場合には最大圧力が0.22 MPa、2 mを挿入した場合には0.187 MPaに減少した。すなわち、軟らかい管を1 m及び2 m挿入することで最大圧力が50.9 %、58.3 % 低減する結果を得た。

図(A.6)は軟らかい管を管路の中間の位置に挿入した場合と主管だけの場合の過渡圧力波を示す。この場合では、下流に挿入した場合とは違い、複雑な波形となるが、軟らかい管の挿入による最大圧力の緩和は確認できる。軟らかい管を管路の中間に挿入した場合には管長1 m及び2 mに対して、最大圧力は0.364 MPa及び0.368 MPaで、主管だけの場合の最大圧力0.448 MPaより約18 % 緩和した。

挿入する軟らかい管の長さとの最大圧力の関係を図(A.7)に示す。図(A.7)の計算結果から、挿入管単位長さ当たりの緩和効果は、長くなるほど弱くなることがわかった。挿入管長0.5 mのときの最大圧力の緩和効果は0.189 MPaであったが、0.5 m延長されたときの緩和効果は0.033 MPaであった。さらに、1 mずつ延長しても、その緩和効果は0.037、0.014、0.009、0.007 MPaになり、挿入する軟らかい管の長さによる効果は弱くなる。

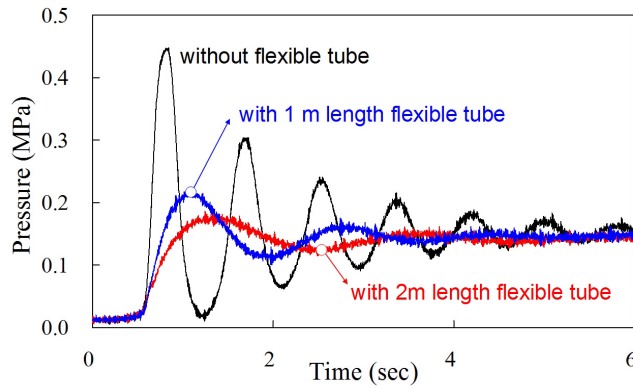


Fig. A.5: Time histories of pressure with 1 and 2 m length flexible tube inserted at down

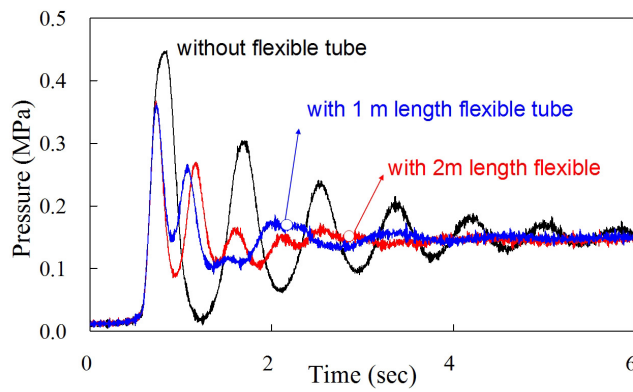


Fig. A.6: Time histories of pressure with 1 and 2 m length flexible tube inserted at middle of pipeline

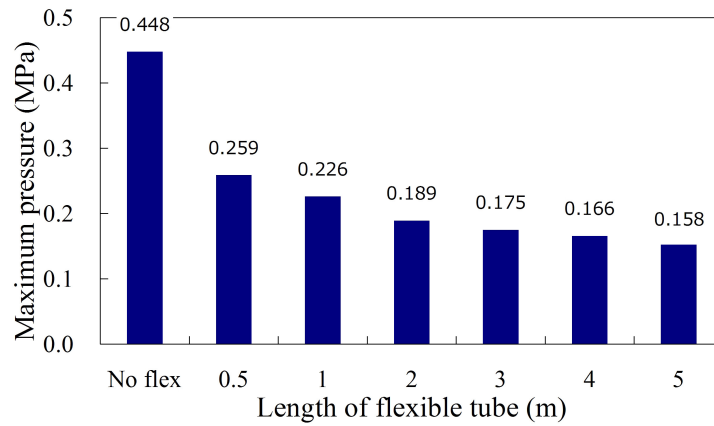


Fig. A.7: Calculated maximum pressure as length of flexible tube

A.1.5 軟らかい管の挿入位置による影響

図(A.8)及び図(A.9)、は管長1 m及び2 mの軟らかい管を主管の上流、下流、中間に挿入した場合の圧力変動を示したものである。図のように、同じ長さの軟らかい管を挿入しても、挿入位置によって最大圧力の緩和効果は異なる。図(A.10)では、軟らかい管の長さ及び挿入位置による最大圧力を比較した。今、主管長さ(86 m)の1.16%、2.32%に相当する管長1 m及び2 mの軟らかい管を挿入することで、最大圧力が50%以上緩和された。図のように、挿入位置が過渡流れ発生位置から離れるほど最大圧力の緩和効果は弱くなることが確認できる。

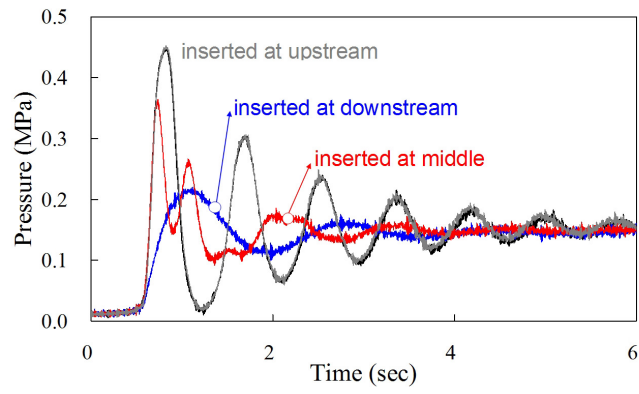


Fig. A.8: Time histories of pressure with 1 *m* length flexible tube

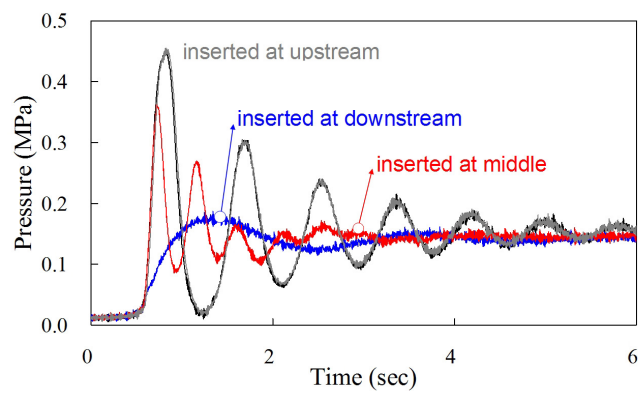


Fig. A.9: Time histories of pressure with 2 *m* length flexible tube

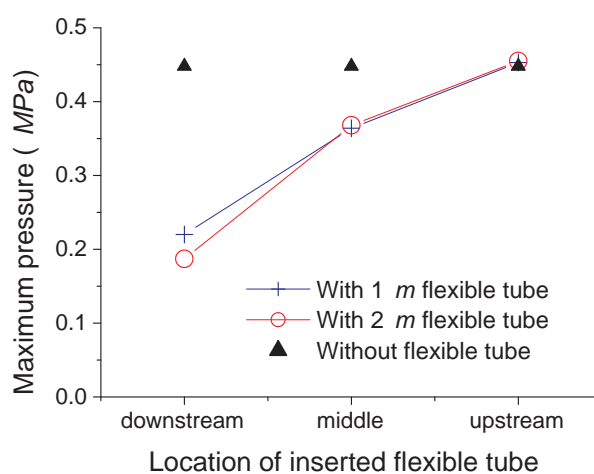


Fig. A.10: The maximum pressure with 1 and 2 m length flexible tube

A.1.6 ベローズ管の形状による影響

図(A.11)に、ベローズ管のみの管路で、初期流量を変化させたときの圧力変動の実験結果を示す。初期流量によって各圧力波の振動周波数が変わることが確認できる。この実験では、流量調節をポンプではなく、下流側のバルブで行ったため、流量が少なくなるにつれ下流側の定常圧力が上昇している。

表(A.2)には、流量による定常圧力、及び圧力波の音速を比較した。さらに、その定常圧力と音速を比較したものが図(A.12)である。定常圧力と音速の間にほぼ線形関係があることが確認できる。計算で求めたベローズ管の音速は 363 m/s であったが、実験では初期圧力によって音速が変わっている。これは、ベローズ管の音速には、その形状由来のばねによる

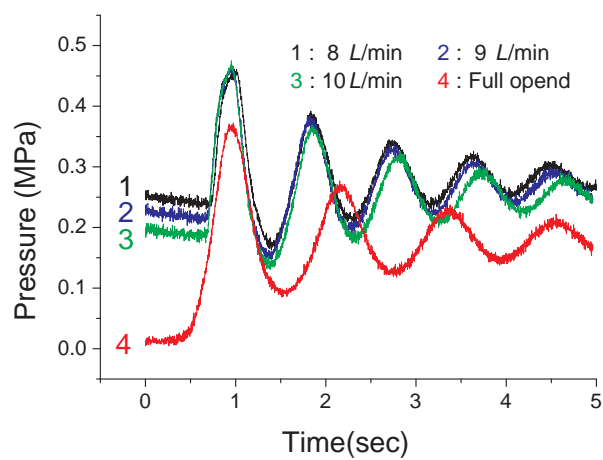


Fig. A.11: Measured pressure fluctuations for various flow rates

変形率の方が大きいので、初期圧力によって、ベローズ管のばね形状が変化するためと考えられる。管内の初期圧力が高いと、ベローズ管は圧力によって変形し、図(A.4)のようにばね形状から円筒管のようになり、変形率が低下すると考えられる。

Table A.2: Wave speeds for flow rate and steady pressure

Flow rate (L/min)	8	9	10	16 Full opened
Wave speed (m/s)	368	360	349	272
Steady pressure (MPa)	0.2357	0.2281	0.1959	0.011

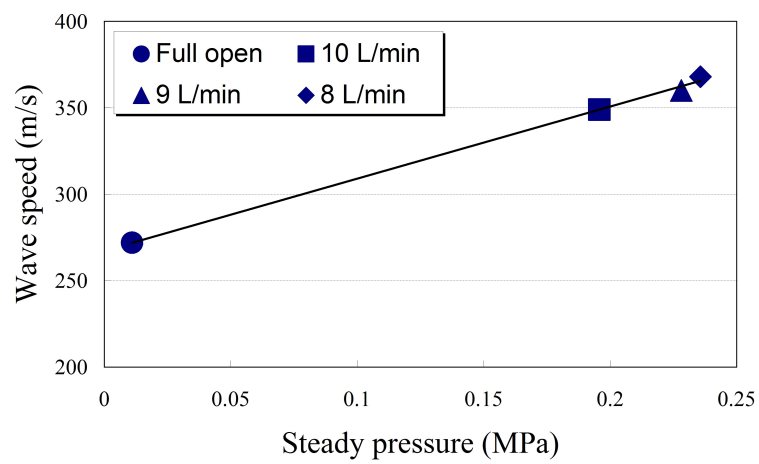


Fig. A.12: Wave speed for various steady pressures

A.2 定常逆解法

給水管網での漏れは、圧力や流量を測定し、逆解析によって漏れの位置と大きさを探索することができる。定常逆解法は、定常の圧力を利用して、測定圧力と計算圧力を評価することによって漏れを探索する方法である [13]。

節点とその節点間を連結する管路でできたシステムで、漏れ及び流出は節点だけにあるとすると、次のような関係が成立する。

$$\sum_{pipes} Q_{ij} = D_i + q_i^l \quad (A.23)$$

ここで、 Q_{ij} は節点 i と j の間の流量、 D_i は節点での要求量、 q_i^l は節点での漏れ流量、である。このとき、圧力損失は

$$p_i - p_j = K_{ij} |Q_{ij}|^{n-1} Q_{ij} \quad (A.24)$$

である。ここで、 K_{ij} は節点 i と j の間の管摩擦抵抗係数である。

通常解析では、求めるものは要求される流量を輸送するための圧力 p である。これは、要求量 D_i 、管路の特性である K は既知の値で、節点方程式 (A.23) と圧力損失式 (A.24) を利用して計算する。一方、逆解法では圧力 p は既知の値で、管路の特性 K や節点の流出量である漏れを求める。

図 (A.13) は逆解法の例としたもので、三つの管摩擦抵抗係数 $K(K_{12}$ 、 K_{32} 、 $K_{13})$ 、節点 2 の流出量 ($D_2 = 10 \ell/min$ 、 $q_2^l = 0$)、節点 1 と 3 の圧力

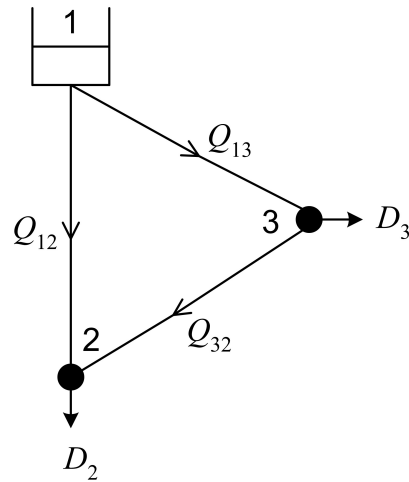


Fig. A.13: Simple pipeline system for inverse steady-state method

($p_1 = 0.5 \text{ MPa}$ 、 $p_3 = 0.2 \text{ MPa}$)を既知として、節点3の漏れ(q_3^l)を求める問題である。

ここで、閉管路での圧力関係を示す閉管路の方程式

$$p_2 + p_3 - p_1 = 0 \quad (\text{A.25})$$

節点方程式 (A.23) からの関係

$$-Q_{13} - Q_{12} = D_1 + q_1^l \quad (\text{A.26})$$

$$Q_{12} - Q_{32} = D_2 + q_2^l \quad (\text{A.27})$$

$$Q_{13} - Q_{32} = D_3 + q_3^l \quad (\text{A.28})$$

圧力損失式 (A.24) の関係を適用すると

$$p_1 - p_3 = K_{13}Q_{13}^2 \quad (\text{A.29})$$

$$p_1 - p_2 = K_{12}Q_{12}^2 \quad (\text{A.30})$$

$$p_3 - p_2 = K_{32}Q_{32}^2 \quad (\text{A.31})$$

になる。ここで、式 (A.25) から p_2 が、式 (A.29) から Q_{13} 、式 (A.26) から Q_{12} 、式 (A.27) から Q_{32} が得られる。さらに、式 (A.28) から節点 3 での流出量と漏れ流量が得られ、これを要求量と比較することで漏れ流量が計算できる。このように、節点での漏れを探すために管路の任意点の圧力を測定して計算する方法が定常逆解法 (The inverse steady-state method) である。