音響法によるガスパイプラインの詰まりの推定

小 山 弘*・渡 辺 嘉二郎**

Identification of a Partial Plugging in a Gas-Transport Pipeline by Acoustic Method

Hiroshi KOYAMA* and Kajiro WATANABE**

This paper describes how to accurately locate and estimate a partial plugging in a gastransport pipeline by an acoustic method.

The acoustic method proposed is one of the indirect estimation methods. This method identifies the inner structure of the pipeline via the acoustic standing waves excited by noise introduced at one terminal of the pipeline.

Experiment and simulation to ensure the method were carried out. The pipe made of vinyl chloride whose length is 4.113m and whose diameter is 16.0 mm (cross-sectional area was 201mm²) was employed. To avoid disturbing influences, the pipe was straight and had the uniform cross-sectional area without any connecting point. Results by experiment and simulation demonstrated very similar time responses which show the clear pulses due to a partial plugging. From the shape of pulses and the pulse occurrence times, the location and the degree of the partial plugging were calculated. A partial plugging with open diameter of 15.6 mm (95% cross-sectional area of the pipeline) was clearly located and estimated with reasonable accuracy.

Key Words: fault diagnosis, pipeline monitoring, partial plugging, location, acoustic method

1. 序 論

近年、地球の温暖化現象を背景に、炭素の少ない天然ガスが再注目され、その輸送手段であるパイプラインのモニタについても再検討されてきている。また、都市ガス輸送や工場内ガス輸送も一旦故障が起これと

大事故につながり、精度の良いパイプラインモニタは今日でも重要な研究課題である。

パイプラインモニタの最大の課題はリークの位置と程度の推定である。さらにリークの原因になったり輸送効率を下げる詰まりの位置と程度の推定も重要課題である。特にウエットガスを輸送する場合、ガス内水分が結露しパイプラインの低い部分に水が溜ることがあり、これを放置しておくで輸送効率は下るし、錆びついてリークの原因にもなる。現在、詰まりの位置と程度を安価に正確に調べる方法はない。

パイプラインモニタ法は直接法と間接法に大分される。直接法はパイプラインに沿ってパイプを内外から直接調べる方法である。リーク検出の場合、自然界に存在しないガスを混在し検出する方法¹⁾、高圧パイプのリーク穴から生ずる超音波を検出する方法^{2),3)}が代表例である。また、パイプの内側をモニタする方法として、管内にロボットを入れ直接管壁を検査する方法がある。直接法は正確なモニタが可能である反面、モニタ範囲が制限されその作業は大規模、高価になる。

間接法は、パイプラインの数ヶ所の圧力、流量などの情報から、パイプライン全体をモニタする方法である。リークの検出法の例には、上下流間のガス収支からリークの存在を検出する方法⁴⁾⁻⁷⁾、状態観測器を応用しリーク位置を検出する方法⁸⁾、パイプラインの流量と圧力のモデルを正確に作り、その実時間シミュレーション波形と実測データを比較する方法⁹⁾がある。この実時間シミュレーションによる方法は、リークの位置の検出やガス輸送状態を総合的にモニタできるが、きわめて高い精度のセンサを必要とする。

本論の音響法は間接法の一つである。リーク検出の場合、少数のセンサ、少ないデータ処理でリークの有無だけでなく位置も推定でき、リークのない状態と比較する必要がないなどの特徴をもつ。音響法によるリーク検出については、その原理が実験とシミュレーションにより確認され¹⁰⁾⁻¹³⁾、複数個のリーク検出につ

† 第31回自動制御連合講演会で発表 (1988・10)

* 法政大学大学院 小金井市梶野町 3-7-2

** 法政大学工学部 小金井市梶野町 3-7-2

* Graduate Student of System Engineering, Hosei University, Koganei

** Faculty of Engineering, Hosei University, Koganei

(Received July 6, 1989)

(Revised August 30, 1989)

いても検討されている¹⁴⁾。

本論はこの音響法をパイプラインの詰まりの推定に応用するものである。ここでは、パイプラインの詰まりの位置と程度を正確にしかも安価に推定する方法を提案する。この方法の妥当性をシミュレーションと実験により確認する。

2. 音響法によるパイプラインの詰まりの推定方法

2.1 パイプラインと仮定

音響法とは、パイプラインの一端にテスト信号として雑音を加え、その内部に定在する音によりパイプラインの内部構造を推定する方法である。パイプラインの一点に雑音を加え、その点ともう一点にマイクロフォンを設置し、二点で音圧を検出する。この二つのマイクロフォンを設置した区間内をパイプラインモニタの対象とし、テスト区間と呼ぶ。

いまこのテスト区間において以下の仮定を設ける。

- (A1) ガス輸送速度、温度、音速は一定である。
- (A2) ガスは理想気体とする。
- (A3) 詰まりは 1 ヲ所にしかないものとする。
- (A4) 分岐管、合流管は存在しない。
- (A5) パイプのガス通過断面積は一定である。
- (A6) ガス通過断面積を変える曲がり存在しない。
- (A7) パイプラインに膨らみは存在しない。
- (A8) テスト信号(雑音)により発生する定在波は二つのマイクロフォンで検出できる。
- (A9) テスト区間の両端は閉鎖されている。

仮定(A1), (A2)はガスとその輸送状態に関するもので、定常ガス輸送状態ではこれらの仮定は満たされる。連続的にモニタする場合、複数個の詰まりが同時に発生する確率は低い。したがって、仮定(A3)は無理がない。

仮定(A4)~(A7)はパイプラインについての仮定である。一般的にパイプラインは分岐管、合流管や曲がりをもつ。これらの存在は詰まりの推定を困難にする。うまくテスト区間を設定しこれらを避け、仮定(A4)~(A7)を満たす必要がある。

仮定(A8)はテスト信号をどのように選ぶかに関する仮定である。テスト信号には疑似白色雑音を用い、その周波数帯域はテスト区間の長さより決定される。すなわち、テスト区間が長い場合には低周波帯雑音を、短い場合には高周波まで帯域のある雑音を用いる。テスト区間が長い場合には音の減衰が大きくなり、大振幅の信号を与える必要がある。たとえば、流

量制御バルブなどをランダムに開閉すればよい。短い場合にはスピーカなどにより高周波雑音を加える。

仮定(A9)はパイプラインのテスト区間がラインバック状態にあることを示す。このような状態は作れる。

2.2 詰まりのあるパイプの音響伝搬の数学モデル

詰まりのあるパイプ内の音響伝搬の数学モデルを作る。はじめに、変数と定数を定義する。

[パイプラインに関する定数]

- L : テスト区間の長さ
- A : パイプの断面積
- d : パイプの内径(直径)

[詰まりに関する定数]

- l_1 : 入力端から詰まりまでの長さ
- l_2 : 詰まりの長さ
- l_3 : 詰まりから出力端までの長さ
- l_p : 入力端から詰まりの中心までの長さ
- A_p : 詰まりの部分のガス通過断面積
- d_p : 詰まりの部分の内径(直径)

[輸送ガスに関する定数]

- ρ : ガスの密度 η : ガスの粘度
- C_0 : 音速 v : ガスの輸送速度
- M : ガスの輸送速度のマッハ数 ($=v/C_0$)
- k : 音響減衰係数 ($=2\eta/3\rho C_0$)
- C_f : ガス輸送方向の音響伝搬速度 ($=C_0+v$)
- C_b : ガス輸送逆方向の音響伝搬速度 ($=C_0-v$)

[音響伝搬に関する変数]

- $f(t, x)$: ガス輸送方向の音の粒子速度
- $b(t, x)$: ガス輸送逆方向の音の粒子速度
- $u(t, x)$: 音の粒子速度
- $p(t, x)$: 音圧
- x : 変位 t : 時刻
- ω : 角周波数 f : 周波数
- T : 温度

[計測における定数]

- τ : サンプリング間隔
- $f_{\max}$: 最大周波数 N : 分割個数
- Δx : 分解能 N_s : サンプル数

[パイプ内の音響波の伝搬]

仮定(A1), (A2)からパイプ内を伝搬する音は、つぎの波動伝搬方程式により記述される。

$$\frac{\partial f(t, x)}{\partial x} = -\frac{1}{C_f} \frac{\partial f(t, x)}{\partial t} + k \frac{\partial^2 f(t, x)}{\partial t^2} \quad (1a)$$

$$-\frac{\partial b(t, x)}{\partial x} = -\frac{1}{C_b} \frac{\partial b(t, x)}{\partial t} - k \frac{\partial^2 b(t, x)}{\partial t^2} \quad (1b)$$

$$p(t, x) = (\rho C_f / A) \cdot f(t, x) - (\rho C_b / A) \cdot b(t, x) \quad (1c)$$

$$u(t, x) = f(t, x) + b(t, x) \quad (1d)$$

(1)式を Fourier 変換し、測定可能な変量 $P(i\omega, x)$, $U(i\omega, x)$ を用いると、区間 $[0, x]$ の音響波の伝搬は、分布定数系の四端子回路理論に基づきつぎのように表わされる¹⁵⁾。

$$\begin{bmatrix} P(i\omega, x) \\ U(i\omega, x) \end{bmatrix} = E(i\omega, x, A) \begin{bmatrix} P(i\omega, 0) \\ U(i\omega, 0) \end{bmatrix} \quad (2a)$$

$$E(i\omega, x, A) = e^{-\zeta x} \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} \\ f_{21} & f_{22} \end{bmatrix} \quad (2b)$$

$$\zeta = -k\omega^2 + iM\omega / C_0(1-M^2) \quad (2c)$$

$$f_{11} = \cos \frac{\omega x}{C_0(1-M^2)} - iM \sin \frac{\omega x}{C_0(1-M^2)} \quad (2d)$$

$$f_{12} = -i \frac{\rho C_0(1-M^2)}{A} \sin \frac{\omega x}{C_0(1-M^2)} \quad (2e)$$

$$f_{21} = -i \frac{A}{\rho C_0} \sin \frac{\omega x}{C_0(1-M^2)} \quad (2f)$$

$$f_{22} = \cos \frac{\omega x}{C_0(1-M^2)} + iM \sin \frac{\omega x}{C_0(1-M^2)} \quad (2g)$$

ここで、 $\exp(-\zeta x)$ は音響減衰、 $E(i\omega, x, A)$ は音響伝搬特性を表わしている。

【詰まりのあるパイプの音響特性】

Fig. 1 に示す詰まりのあるパイプの音響伝搬は、(2)式よりつぎの関係式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} P(i\omega, 0) \\ U(i\omega, 0) \end{bmatrix} = E^{-1}(i\omega, l_1, A) \cdot E^{-1}(i\omega, l_2, A_p) \cdot E^{-1}(i\omega, l_3, A) \begin{bmatrix} P(i\omega, L) \\ U(i\omega, L) \end{bmatrix} \quad (3)$$

【テスト区間の音圧伝搬】

仮定(A9)よりテスト区間の出力端は閉じており、出力端 (L 点) の粒子速度は、

$$U(i\omega, L) = 0 \quad (4)$$

となる。上式では出力端が完全に閉じているとしたが、実際には出力端を絞るだけでガスが多少流れ、 $U(i\omega, L) \neq 0$ なる前提で議論しておいたほうがよい。そのため以下では $M \neq 0$ として一般的に式を展開しておく。(3)、(4)式より粒子速度の項を消去し両端

Fig. 1 Scheme of a pipe with a partial plugging

における音圧の Fourier 変換の比 $G(i\omega)$ を求めると次式となる。

$$G(i\omega) = \frac{P(i\omega, 0)}{P(i\omega, L)} = e^{\zeta L} \cdot [C_1 \cos(t_1\omega) + C_2 \cos(t_2\omega) + C_3 \cos(t_3\omega) + C_4 \cos(t_4\omega)] \quad (5)$$

$$C_1 = (A + A_p)^2 / 4AA_p,$$

$$t_1 = (l_1 + l_2 + l_3) / C_0(1 - M^2)$$

$$C_2 = (A^2 - A_p^2) / 4AA_p,$$

$$t_2 = (l_1 - l_2 - l_3) / C_0(1 - M^2)$$

$$C_3 = -(A^2 - A_p^2) / 4AA_p,$$

$$t_3 = (l_1 + l_2 - l_3) / C_0(1 - M^2)$$

$$C_4 = -(A - A_p)^2 / 4AA_p,$$

$$t_4 = (l_1 - l_2 + l_3) / C_0(1 - M^2)$$

上式の $\zeta = -k\omega^2 + iM\omega / C_0(1 - M^2)$ において $M \neq 0$ であり、 $k\omega^2$ は計測に使う周波数範囲ではほとんど 0 となるので、 $\zeta \approx 0$ とおける。

2.3 詰まりの位置とその程度の推定

(5)式より詰まりの位置 (l_p) と程度 (A_p/A) を求める。そのためには、 $t_1 \sim t_4$ と $C_1 \sim C_4$ を推定する必要がある。(5)式において、 $t_1 \sim t_4$ は余弦関数の周期、 $C_1 \sim C_4$ は振幅である。(5)式は 4 余弦関数の和であり、直接これらの周期と振幅を読み取ることは困難である。(5)式を Fourier 逆変換したつぎの(6a)式により時間応答関数 $g(t)$ を求め、それより $t_1 \sim t_4$ と $C_1 \sim C_4$ の値を求める。

$$g(t) = \mathcal{F}^{-1}[G(i\omega)] = \mathcal{F}^{-1}\left[\frac{\mathcal{F}\{p(t, 0)\}}{\mathcal{F}\{p(t, L)\}}\right] \quad (6a)$$

ここで $\mathcal{F}$ は Fourier 変換、 $\mathcal{F}^{-1}$ は Fourier 逆変換を示す。 $\zeta = 0$ の場合、(5)式より(6a)式の $g(t)$ はつぎのようになる。

$$g(t) = C_1 \delta(t - t_1) + C_2 \delta(t - t_2) + C_3 \delta(t - t_3) + C_4 \delta(t - t_4) \quad (6b)$$

ここで δ はクロネッカーのデルタ関数を示す。

応答波形 $g(t)$ では時刻 t_1, t_2, t_3, t_4 でそれぞれ大きさ C_1, C_2, C_3, C_4 のパルス状の変化が起こる。これらの時刻より詰まりの位置が、パルスの大きさより詰まりの程度が推定できる。ただし、どのパルスが(5)式のどの余弦波項に対応しているかを判別しなければならない。つぎにその対応づけ手順を示す。

- ①一番遅く発生するパルス時刻が t_1 で、そのパルスの大きさは C_1 である。この値で $g(t)$ を正規化する。
- ②最小パルスは t_4 で発生しその大きさは C_4 である。
- ③残された 2 つのパルスのうち、大きな正のパルス

の現れる時刻が t_2 , 負のパルスが現れる時刻が t_3 である.

(5)式より詰まりと膨らみでは C_2 と C_3 の符号が反転する. よって膨らみの場合には手順③のパルスの現れ方が逆になる.

詰まりの位置と程度は次式より求められる.

$$L = t_1 \cdot C_0 \cdot (1 - M^2) \quad (7a)$$

$$L_p = \{t_1 + S_{ng} \cdot (t_2 + t_3)/2\} \cdot C_0 \cdot (1 - M^2)/2 \quad (7b)$$

ここで S_{ng} は次式により定まる.

$$\text{if } t_2 > t_3 \text{ then } S_{ng} = -1 \text{ else } S_{ng} = 1 \quad (7c)$$

詰まりのガス通過断面積比はつぎようになる.

$$A_p/A = \frac{1 - C_2/C_1}{1 + C_2/C_1} = \frac{1 + C_3/C_1}{1 - C_3/C_1} \quad (7d)$$

以上の議論で両端が完全に閉じている場合, ガスは流れないので $M=0$ とすればよい.

2.4 計測方法

(6)式をディジタル処理する. 音圧 $p(t, 0)$, $p(t, L)$ を A/D 変換器により計算機内に取り込む. Fourier 変換は FFT を用いて処理をする. A/D 変換のサンプリング間隔 τ と詰まりの位置の分解能 Δx , テスト区間の分割個数 N , 最大周波数 $f_{\max}$ の関係は以下の式で与えられる.

$$\Delta x = C_0(1 - M^2)\tau/2 \quad (8a)$$

$$N = L/\Delta x = 2L/C_0(1 - M^2)\tau \quad (8b)$$

$$f_{\max} = 1/2\tau \quad (8c)$$

サンプル数 N_s はつぎの関係を満たす必要がある.

$$N_s/2 > L/C_0(1 - M^2)\tau = N/2 \quad (8d)$$

上式を満たさない場合, テスト区間の長さを示す時刻 t_1 は応答波形 $g(t)$ 上に現れなくなる.

3. 短距離パイプラインにおけるシミュレーションと実験結果

3.1 実験条件

以上の推定法の妥当性を確認するために, 実験と同じ条件下のシミュレーションを行った. シミュレーションのためのモデルは推定方法を導出したものを用いた. 以下にその条件を示す.

【パイプラインに関する定数】パイプは塩化ビニール製; $L=4.113$ m; $d=16.0$ mm; $A=201$ mm²

【輸送ガスに関する定数】輸送ガスは空気; $\rho=1.184$ kg/m³; $\eta=1.82 \times 10^{-5}$ kg/ms; $T=21^\circ\text{C}$; $C_0=343.9$ m/s; パイプの両端を閉じ, ガス流をなくし $v=0$ m/s; $M=0$ とする.

【計測条件】雑音は 13 ビット M 系列信号; $\tau=100$ μs ; $N=239$; $\Delta x=0.017$ m; $f_{\max}=5,000$ Hz; $N_s=8,192$

実験装置とデータ処理の概要を Fig. 2 に示す. 実験では, 12 ビット A/D 変換器でデータを取り込み, ミニコンで処理を行った.

3.2 実験とシミュレーションの結果

上記の条件のもとでの実験およびシミュレーション結果を Fig. 3, 4 に示す. Fig. 3, 4 のシミュレー

Fig. 2 Experimental system and the procedure of estimation

(a) Simulation result when no partial plugging exists

(b) Experimental result when no partial plugging exists

Fig. 3

(a) Simulation result when a partial plugging exists ($l_p=1.307\text{m}$; $l_2=0.020\text{m}$; $d_p=9.0\text{mm}$)

(b) Experimental result when a partial plugging exists ($l_p=1.307\text{m}$; $l_2=0.020\text{m}$; $d_p=9.0\text{mm}$)

(c) Experimental result when a partial plugging exists ($l_p=2.806\text{m}$; $l_2=0.020\text{m}$; $d_p=9.0\text{mm}$)

Fig. 4

シヨンと実験結果の応答波形は酷似している。パルスが詰まりの有無にかかわらず 12.0 ms に発生している。これがテスト区間の長さを示す t_1 である。これより推定されたテスト区間の長さは 4.127 m であり、誤差は 14 mm であった。

Fig. 4 では $t_1 (=4.127\text{m})$ のパルスの他に 4.3 ms に負のパルス、4.5 ms に正のパルスをもつ。これらのパルスは正負はほぼ同じ大きさで接近して発生している。よって詰まりの長さが短いために t_4 は t_1 に隠れている。パルスの正の頂点の時刻が t_2 、負の頂点の時

刻が t_3 である。Fig. 4(b), (c) はテスト区間の前半部と後半部の対称の位置に詰まりがある場合である。そのため t_2 と t_3 が逆になり、同時刻に正負逆のパルスが現れている。(b)より求めた詰まりの位置が $l_p=1.307\text{m}$ (誤差 0 mm), (c)では $l_p=2.820\text{m}$ (誤差 14 mm) となった。これらの位置は分解能 Δx 以内の値である。また、詰まりの大きさは(b)で $d_p=9.1\text{mm}$, (c)で $d_p=9.2\text{mm}$ となりほぼ設定値を得た。

3.3 詰まりの断面積

詰まりの位置と長さを $l_p=1.307\text{m}$, $l_2=0.020\text{m}$ (0.010 m, 0.005 m) に設定し、詰まりの内径を $d_p=2.0\sim 14.0\text{mm}$ の範囲で変えた場合の実験結果を Fig. 5 に示す。Fig. 5(a)は通過面が円の場合で、設定した詰まりの通過断面積比 (A_p/A) と $g(t)$ のパルスの大きさの比 C_p/C_1 (C_p は C_2 と C_3 の大きいほう) の関係を示した図である。実線は理論値を示す。その他の記号 ($\diamond$, $\square$, $\triangle$) は実験結果である。詰まりの長さが $l_2=0.020\text{m}$ の実験結果は理論値とよく合っている。詰まりの内径が小さくなるほど理論値から

(a) Relation between the ratio of cross-sectional areas and the ratio of peaks of pulses ($l_p=1.307\text{m}$)

(b) Relation between the ratio of cross-sectional areas and the ratio of peaks of pulses for various shapes of a partial plugging ($l_p=1.307\text{m}$; $l_2=0.020\text{m}$)

Fig. 5

の差が大きくなる傾向がある。これは通過断面積が小さくなりすぎ、(1)式で記述できない現象が起こったためと考えられる。

Fig. 5(b)は中空の詰まりでなく、パイプライン内に断面の形状が丸、四角、三角の物体が置かれた状況での実験結果である。図では形状による違いは現れておらず、詰まりの断面積のみによってことが判明した。今回の実験では $A_p/A=0.95$ までの詰まりが判定できた。

3.4 詰まりの長さ

詰まりの位置と通過断面積比を $l_p=1.307$ m, $A_p/A=0.32$ ($d_p/d=9.0$ mm/16.0 mm) に設定し、長さを変えた場合の実験結果を Fig. 6 に示す。図では、0.017 m 付近を境にしてパルスの大きさが理論値より小さくなる。これは詰まりの長さが分解能 $\Delta x=0.017$ m より小さくなると、FFT 処理により求めた $G(i\omega)$ では t_2 と t_3 の差が分解できなくなり、成分のうち C_2 と C_3 の項が互いに消し合ってしまうためである。詰まりが分解能 Δx より長い場合に理論値より少し大きな値をもつのは、パルスの大きさの読み取りにおいて正負のうちで大きい値を採用したためである。

3.5 詰まりの位置

詰まりの通過断面積比と長さを $A_p/A=0.32$, $l_2=0.020$ m に設定し、その位置を $l_p=2.056, 1.806, 1.557, 1.307, 1.056, 0.806, 0.557, 0.307$ m と8通りに変えた場合の実験結果を Fig. 7 に示す。Fig. 7 には $l_p=2.056$ m の場合のパルスが現れていない。これは詰まりがテスト区間の中心に存在したためである。正負のパルスの現れる時刻が等しくなり互いに打ち消し合っている。パルスの現れている7波形の位置の推定誤差の最大値は 0.008 m であった。各パルスはほぼ同じ大きさを持ち、詰まりの位置が異なっても詰まりの位置と程度が推定できる。

Fig. 6 Relation between the length of a partial plugging and the ratio of peaks of pulses ($l_2=0.020$ m; $d_p=9.0$ mm)

Fig. 7 Experimental results for various locations of a partial plugging
[l_p =①1.806m, ②1.557m, ③1.307m, ④1.056m, ⑤0.806m, ⑥0.557m, ⑦0.307m, ⑧2.056m; $l_2=0.020$ m; $d_p=9.0$ mm]

4. 結 論

音響法によるリーク検出方法を拡張し、パイプライン内の詰まりの位置と程度の推定法を提案した。

本方法の妥当性を確認するために、長さ 4.113 m の塩化ビニール管を用いた実験と推定理論の基礎となるモデルによるシミュレーションを行った。双方の結果の応答波形はよく合い、推定理論の正しさが確認された。

つぎに大小さまざまな断面積と長さの詰まりについて、そして詰まりの位置をあちこちに設定して実験を行った。詰まりの断面積を変えた実験より、詰まりが大きく極端にガス通過断面積が小さくなる場合を除き、本方法により詰まりの断面積が正確に推定できることがわかった。詰まりの形状は結果に影響を与えず、ガス通過断面積のみが影響を与える。推定できた最小の詰まりの通過断面積は、パイプ断面積の 95% であった。

詰まりの長さを変えた実験より、離散処理上の分解能より詰まりの長さが短くなると観測されるパルスの大きさが小さくなり、実際より小さな詰まりと推定される。それ以上に長い詰まりについては正確に推定された。詰まりの位置を変えた実験より、テスト区間の中心にある詰まりを除き位置と程度が正確に推定できることが判明した。

本論ではガスパイプラインについて検討したが、パイプラインで輸送する物質の音響伝搬方程式が(1)式で記述できれば、他の物質の輸送パイプラインの詰まりの検出にも適用できると考えられる。

本方法はラインバック状態を前提としている。仮定(A9)を緩めた方法への拡張が今後の課題である。

参 考 文 献

- 1) H. W. Decker: Pipeline Leak Detection Using Nitrous Oxide Method, Pap. Summ. ASNT. Natl. Conf. (U. S. A.), 357/359 (1978)
- 2) P. M. Heim: Leakage Detection on Buried Pipelines, Conf. Pap. Int. Pipeline Technol. Conv. (U. S. A.) 7th, 169/176 (1979)
- 3) J. G. Parker and A. N. Jette: Excitation of an Elastic Half-Space by a Buried Line Source of Conical Waves, Journal of Sound and Vibration, **67**, 523/531 (1979)
- 4) 菅谷 茂: パイプラインの漏洩の検知と現状, 計測と制御, **18-5**, 425/430 (1979)
- 5) D. E. Goldberg: Transient Leak Detection, Conf. Pap. Int. Pipeline Technol. Conv. (U. S. A.) 7th, 117/183 (1979)
- 6) D. W. Huber: Real-time Transient Model for Batch Tracking, Line Balance and Leak Detection, Journal Can. Pet. Technol. (CAN.), **20-3**, 46/53 (1981)
- 7) T. P. Lindsey and J. C. Vanelli: Real-Time Flow Modeling, and Applications in Pipeline Measurement and Control, Rec. Conf. Pap. Annu. Pet. Chem. Ind. Conf. (U. S. A.) 28th, 189/192 (1981)
- 8) G. K. Schmidt and G. Lappus: Dynamical Observers for State Reconstruction and Leak Detection in Natural Gas Pipeline Systems, Proc. Jt Autom. Control Conf. (U. S. A.), **2**, TP6. E1/TP6. E2 (1980)
- 9) 木内龍彦: 実時間 シミュレーションによるパイプライン網の漏洩検知, モニタリング技術, 天然ガス, 9/14 (1988)
- 10) 渡辺, 十河: 気体輸送パイプラインの管内音響伝搬特性を利用した漏洩位置の検知法, 計測自動制御学会論文集, **16-6**, 886/890 (1980)
- 11) K. Watanabe: On Locating a Leak of Gas Transport Pipeline by Acoustic Method, The Journal of Fluid Control, **14-1**, 39/55 (1982)
- 12) K. Watanabe and D. M. Himmelblau: Detection and Location of a Leak in a Gas-Transport Pipeline by a New Acoustic Method, AIChE Journal (U. S. A.), **32-10**, 1690/1701 (1986)
- 13) 渡辺嘉二郎: 音響法による長距離ガス輸送管のリーク場所の推定, 計測自動制御学会論文集, **23-2**, 163/170 (1987)
- 14) K. Watanabe, H. Koyama and H. Ohno: Location of Leaks in Gas-Transport Pipeline by Acoustic Method, Proceedings of ISA/87, Int. Conf. and Exh. (U. S. A.), 619/626 (1987)
- 15) L. A. Pipes and S. A. Hovanessian: Matrix-Computer Methods in Engineering, 160/180, A Wiley International Edition (1969)