音響法による長距離ガス輸送管のリーク場所の推定[†]

渡 辺 嘉二郎*

Leak Location in a Long Gas-Transport Pipeline by an Acoustic Method

Kajiro WATANABE*

This work pertains to the diagnosis of faults in a physically widely dispersed pipeline system. In particular we treat the problem of leak location in a gas transport pipeline.

We have developed a new acoustic method which (a) requires less effort and uses more economical instrumentation than any of the existing method, (b) does not require significant interruption of the pipeline operation, and (c) can locate leak sites clearly. The basic idea underlying the proposed method is derived from the theory of wind instruments. We utilize the fact that the tone of a giant wind instrument (the pipeline) changes in the event of a leak, and we evaluate this change by estimating the acoustic impulse response in the pipeline from acoustic signals detected at the two terminuses of the pipeline.

In addition to explaining the theoretical development that shows why and how the proposed method can detect and locate a leak in a pipeline, we present some experimental results collected under realistic operating conditions with comparisons with simulation results that validate the detection theory and show the desired measurement condition to locate leak site in a gas transport pipeline via simulation.

Key Words: fault diagnosis, gas-pipeline, leak location, acoustic method

1. はじめに

ガス輸送ネットワークは、家庭内、都市内、ガスパラントと都市の間に複雑に張り巡らされており、ガス管にリークが発生し、そのまま放置されると重大な被

害を引き起こす。これを避けるために、リークは速やかに、正確に検知され処理されなければならない。

ガス管のリーク発生あるいは発生場所の検知法は、(1)直接法と(2)間接法に分類できる。直接法は、住民などからリーク発生の通報があったとき、検査員が現場に行き、リークの発生に伴って生じる諸現象よりリークの場所を直接確認する方法である。間接法はリークによって誘発され、かつ長距離に渡って波及する現象をリークから離れた諸ガス施設で観測し、リークの発生あるいはその場所を推定する方法である。

最近の直接法の研究には、自然界に存在しない酸化窒素をガスに混入し、ガス管に沿ってそれを追跡する方法¹⁾、管の小リークからガスが噴き出るとき発生する超音波を検出してリークの場所を発見する方法^{2), 3)}が代表的である。直接法はオンライン法になりえないし、この方法だけで長いガス管のリーク場所を検知することは困難である。

間接法は、(a)リークの有無を検知する方法と、(b)リーク場所まで推定する二つの方法がある。(a)の代表的な方法は管の上流と下流での定常的ガス流量の収支を調べる方法である⁴⁾。近年この考え方を過渡的ガス収支に拡張して、この方法の精度向上の研究が進められている^{5)~7)}が、この方法では所詮リークの有無しか検出できない。

(b)のリーク場所まで推定する間接法は最も困難な方法であるが、オンライン・遠隔方式でリークの場所が推定でき、長距離ガス管に向いている。この例として、天然ガス輸送管に Luenberger 形の観測器を適用して推定される管内の状態よりリークの場所を求める試み⁸⁾があるが、まだこの研究は理論的検討の段階にある。ガス管を巨大な管楽器と考え、リークにより管内に生じる音響定在波からリークの場所を推定する音響法^{9)~12)}は、実験用の短いガス管でその方法が原理的に可能であることは確認されているが、この方法の適用範囲、精度を上げる計測方式については十分に検

[†] 第 28 回自動制御連合講演会で発表 (昭 60・11)

* 法政大学工学部 小金井市梶野町 3-7-2

* Faculty of Engineering, Hosei University, Koganei
(Received May 31, 1986)

(Revised September 10, 1986)

討されていない。

この論文はリークのオンライン・遠隔検出可能な音響法の適用可能範囲, および望ましい計測条件を精密なガス(音響)管モデルを作り, シミュレーションにより明らかにすることを目的とする。

2. 音響法によるガス管のリーク場所の推定法

2.1 仮定

リークを探索するガス管の一部をテスト区間と呼ぶ。音響法はこの区間を巨大な管楽器と考え, リークによってこの区間に立つ音響定在波の周波数よりリーク場所を推定する方法である。ガス管の模型図をFig. 1に示す。ガス管の左端(入力端), 右端(出力端)に絞りを設け, この間をテスト区間とする。いま, このテスト区間においてつぎの仮定を設ける。

- (A1) ガス管は分岐がなく, 管の断面積は一様。
- (A2) 発生するリークの個数は一度に一個。
- (A3) ガスの輸送速度および音速は一定であり, ガス輸送に伴って発生する乱流の影響は無視。
- (A4) 入力端の圧力は(外部圧力を加え)ランダムに変化している。
- (A5) テスト区間の入出力端の圧力が計測される。
- (A6) テスト区間の出力側には右端開放のガス管が接続されている。
- (A7) テスト区間中のパイプに急な曲がりはない。

仮定(A1)に対し, 実際のガス管は多くの分岐を含む。しかし, テスト区間の設定に当たり, 分岐を避けることで, 仮定(A1)は容易に満たされる。また仮定(A2)については, 地震などの場合を除き同時に複数のリークが発生する確率は低い。

仮定(A4)に関連して, 外部から加えられるランダム信号の周波数帯域はテスト区間の長さによって異なるべきである。長いテスト区間の場合, 音響信号の減衰を少なくするため, 低周波信号を利用する。このような低周波ランダム信号はガス流制御バルブをM系列状に開閉させることで容易に作られ, この信号のパワーレベルはかなり大きいものにできる。これにより, 仮定(A5)の圧力計測においてドリフト雑音などがあっても, 高い精度の計測が期待できる。そのほかは実

Fig. 1 Model of the pipeline

際上無理の少ない仮定である。

2.2 リークのある長いガス管の音響数学モデル

つぎに, リークのあるガス管の音響数学モデルを作る。モデルの係数, 変数をつぎのように定義する。

[ガス管に関する定数]

L : テスト区間の長さ

l : テスト区間の入力端($x=0$)からのリークの位置

N : テスト区間を等間隔分割したときの分割数

Δx : リーク場所推定の最小分解分割幅

r : (絞りのガス通過断面積)/(ガス管断面積)

Δ : 絞りの厚さ

αL : 出力絞りの後にあるガス管の長さ

[ガスに関する定数]

v : ガス輸送速度

M : ガス輸送速度のマッハ数 ($M=v/C_0$)

C_0 : 音速

ζ : 音響減衰係数

$C_f = C_0 + v$

$C_b = C_0 - v$

ρ : ガスの密度

η : ガスの粘度

[変数]

t : 時刻

ω : 角周波数

$\mu = \omega / \{C_0(1-M^2)\}$

x : 変位

$f(t, x)$: 進行波の粒子速度

$b(t, x)$: 反射波の粒子速度

$u(t, x)$: 全粒子速度

$p(t, x)$: 音圧

$U(i\mu, x)$: $u(t, x)$ の t に関する Fourier 変換

$P(i\mu, x)$: $p(t, x)$ の t に関する Fourier 変換

[リークに関する定数]

d_l : 円形リークの直径

κ : リークの状況より定まる補正係数で実験などから経験的に定められる係数である

[計測に関する定数]

$\omega_{\max}$: テスト信号あるいは音圧計測での最大周波数

τ : 音圧の離散値計測におけるサンプル間隔

【ガス管のリークの無い部分の音響特性】

Fig. 1 のガス管のリークの無い部分 $[x_1 < x < x_2; \xi = x_2 - x_1]$ はつぎの波動方程式によって記述できる。

$$\frac{\partial f(t, x)}{\partial x} = -\frac{\partial f(t, x)}{C_f \partial t} + \frac{2\eta}{3\rho C_0^2} \cdot \frac{\partial^2 f(t, x)}{\partial^2 t} \quad (1a)$$

$$-\frac{\partial b(t, x)}{\partial x} = -\frac{\partial b(t, x)}{C_b \partial t} - \frac{2\eta}{3\rho C_0^2} \cdot \frac{\partial^2 b(t, x)}{\partial^2 t} \quad (1b)$$

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

$$p(t, x) = \frac{\rho}{A} \{C_f f(t, x) + C_b b(t, x)\} \quad (1d)$$

境界条件はつぎのように与えられる。

$$u(t, x_1) = f(t, x_1) + b(t, x_1) \quad (1e)$$

$$p(t, x_1) = \frac{\rho}{A} \{C_f f(t, x_1) + C_b b(t, x_1)\} \quad (1f)$$

上の方程式で、直接測定できる変量は $u(t, x)$, $p(t, x)$ であり、以下、これらの変量で考える。(1a)~(1d) 式を Fourier 変換し、空間角周波数 μ で表わすと、ベクトル $[P(i\mu, x_1) \ U(i\mu, x_1)]'$ と $[P(i\mu, x_2) \ U(i\mu, x_2)]'$ ($'$ は行列の転値) の間には

$$\begin{bmatrix} P(i\mu, x_2) \\ U(i\mu, x_2) \end{bmatrix} = T(A, i\mu, \xi) \begin{bmatrix} P(i\mu, x_1) \\ U(i\mu, x_1) \end{bmatrix} \quad (2a)$$

なる関係が成立する。ここで $T(A, i\mu, \xi)$ は

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

$$\zeta = (2\eta/3\rho C_0) \{C_0(1-M^2)\mu^2 - iM\mu\}$$

$$f_{11} = \cos(\mu\xi) - iM \sin(\mu\xi)$$

$$f_{12} = -i \{ \rho C_0(1-M^2)/A \} \sin(\mu\xi)$$

$$f_{21} = -i \{ A(1-M^2)/\rho C_0 \} \sin(\mu\xi)$$

$$f_{22} = \cos(\mu\xi) + iM \sin(\mu\xi)$$

である。(2a), (2b) 式は音響管の入出力間 ($x_1 \sim x_2$) の周波数特性を一般的に表わしている。

【リークの音響特性】

リーク直前の $[P(i\mu, l^-) \ U(i\mu, l^-)]'$ とリーク直後の $[P(i\mu, l^+) \ U(i\mu, l^+)]'$ の関係は次式で与えられる^{12), 13)}。

$$\begin{bmatrix} P(i\mu, l^+) \\ U(i\mu, l^+) \end{bmatrix} = T_l(i\mu) \begin{bmatrix} P(i\mu, l^-) \\ U(i\mu, l^-) \end{bmatrix} \quad (2c)$$

ここで、行列 $T_l(i\mu)$ はつぎようになる。

$$T_l(i\mu) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/Z_l & 1 \end{bmatrix} \quad (2d)$$

$$Z_l = iC_0(1-M^2)\mu \frac{8\rho\kappa}{3\pi^2 d_l} \quad (2e)$$

【テスト区間全体 ($x=0 \sim L$) の音響特性】

いま行列 $T(A, i\mu, L)$ をつぎのように定義すると、

$$T(A, i\mu, L) = T(A, i\mu, L-l^+) T_l(i\mu) T(A, i\mu, l^-) \quad (2f)$$

入出力端の圧力、粒子速度の Fourier 変換はつぎのような関係式で与えられる。

$$\begin{bmatrix} P(i\mu, L) \\ U(i\mu, L) \end{bmatrix} = T(A, i\mu, L) \begin{bmatrix} P(i\mu, 0) \\ U(i\mu, 0) \end{bmatrix} \quad (2g)$$

【出力絞りの後 ($x > L$) のガス管の音響特性】

出力絞り以後の音響特性は圧力、粒子速度の Fourier 変換を用いてつぎのように与えられる。

$$\begin{bmatrix} P(i\mu, L+\Delta+\alpha L) \\ U(i\mu, L+\Delta+\alpha L) \end{bmatrix} = T(A, i\mu, \alpha L) \begin{bmatrix} P(rA, i\mu, \alpha L) \\ U(i\mu, L) \end{bmatrix} \quad (2h)$$

【 $P(i\mu, 0)/P(i\mu, L)$ 特性】

仮定 (A6) より、ガス管の終端は開放されており

$$P(i\mu, L+\Delta+\alpha L) = 0 \quad (2i)$$

となる。(2g), (2h) および (2i) 式から粒子速度の項を消去し、式を整理すると、テスト区間の入出力端での圧力の Fourier 変換の比 $P(i\mu, 0)/P(i\mu, L)$ は

$$G(i\mu) = \frac{P(i\mu, 0)}{P(i\mu, L)} = G_1(i\mu) + G_2(i\mu) \frac{G_3(i\mu)}{G_4(i\mu)} \quad (2j)$$

となる。ここで、 $G_1(i\mu)$, $G_2(i\mu)$, $G_3(i\mu)$, $G_4(i\mu)$ はつぎのように定義される。

$$\begin{aligned} G_1(i\mu) &= e^{i\mu L} [\cos(\mu L) \\ &\quad + \frac{i\rho C_0(1-M^2)(\sin(\mu L) - \sin((L-2L)\mu))}{2AZ_l} \\ &\quad + iM\kappa \{\sin(\mu L) \\ &\quad + \frac{i\rho C_0(1-M^2)(\cos(\mu L) - \cos((L-2L)\mu))}{2AZ_l} \}] \\ G_2(i\mu) &= ie^{i\mu L} \left[\frac{\rho C_0(1-M^2)\sin(\mu L)}{A} \sin(\mu L) \right. \\ &\quad \left. - i \frac{\{\rho C_0(1-M^2)\}}{2AZ_l} \{\cos(\mu L) \right. \\ &\quad \left. - \cos((L-l_2)\mu) \} \right] \end{aligned}$$

$$G_3(i\mu) = -\{r(1-M) + M\} \sin(\Delta\mu) \sin(\alpha L\mu)$$

$$\begin{aligned} G_4(i\mu) &= \frac{\rho C_0(1-M^2)}{A} [M(1/r-1) \sin(\Delta\mu) \sin(L\alpha\mu) \\ &\quad + i \{\cos(\Delta\mu) \sin(L\alpha\mu) \\ &\quad + (1/r) \sin(\Delta\mu) \cos(L\alpha\mu) \}] \quad (2k) \end{aligned}$$

周波数応答関数 (2j) [(2k)] にはリークの場所 l の情報が含まれる。この関数は測定値 $p(t, 0)$ と $p(t, L)$ を Fourier 変換しそれらの比から求められる。よって実測値から計算された $P(i\mu, 0)/P(i\mu, L)$ に適当な処理を施すことでリークの場所 l が推定できる。

2.3 リークの場所の推定方法

いま、ガスの輸送速度 $v=0$ ($M=0$)、テスト区間の両端を完全に閉鎖し、 $r=0$ とすれば、(2j) 式は

$$\begin{aligned} G(i\mu) &= e^{(2\eta\mu^2 L/3\rho C_0)} [\cos(\mu L) \\ &\quad + \frac{3\pi^2 d_l}{16A\kappa\mu} \{\sin(\mu L) - \sin(\mu(L-2L))\}] \quad (3a) \end{aligned}$$

となる。実験で得られる周波数応答は (3a) 式に対応でき、リークの場所 l は (3a) 式の中で最大周期をもつ第3項の周期と符号から定まる。これは三つの振動的関数の和で与えられ、これから直接、最大周期とその項の符号を求めることは困難である。そこで、ここでは Fourier 変換法を利用して波形の最大周期、符号を求める。(3a) 式は周波数の実数関数であるので、この式に Fourier cosine 逆変換を適用する。

Fig. 2 Relation between leak sites and the impulse response

$$g(x') = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} G(i\omega) \cos \omega x' d\omega$$

$$x' = C_0(1-M^2)t \quad (3b)$$

関数 $g(x')$ は、(a) $l > L/2$ 、(b) $l < L/2$ の場合で、Fig. 2(a), (b) のような二つの形の波形になる。

【 $l < L/2$ の場合】

波形は Fig. 2(a) のようになる。波形がステップ状に立ち上がる場所 x'_1 、立ち下がる場所 x'_2 とリーク場所 l はつぎの関係をもつ。

$$x'_1 = L - 2l, \quad x'_2 = L \quad (3c)$$

これよりリークの場所はつぎのように推定できる。

$$l = (x'_2 - x'_1)/2 \quad (3d)$$

【 $l > L/2$ の場合】

波形は Fig. 2(b) のようになる。波形がステップ状に立ち上がる場所 x'_1 、立ち下がる場所 x'_2 とリーク場所 l はつぎの関係をもつ。

$$-x'_1 = L - 2l, \quad x'_2 = L \quad (3e)$$

これよりリークの場所はつぎのように推定できる。

$$l = (x'_2 + x'_1)/2 \quad (3f)$$

Fig. 2(a), (b) の波形は $0 \sim \infty$ の周波数範囲で Fourier cosine 逆変換した場合の結果である。低周波、高周波成分が 0 の場合で $l < L/2$ のとき、Fig. 2(c) に示すように x'_1 の左側で負のパルス、右側で正のパルスが現れる。 $l > L/2$ のとき、Fig. 2(d) に示すように x'_1 の左側で正、右側で負のパルスが現れる。

2.4 計測方法

(2j), (3b) 式はリーク推定のための応答関数 $g(x')$ を求める基本式である。この基本式の処理は Fourier 変換、逆変換を含む、デジタル計算機処理に向いている。A/D 変換器で離散値的に取り込まれる圧力信号、 $p(t, 0)$, $p(t, L)$ の Fourier 変換、(3b) 式の Fourier cosine 逆変換には FFT が用いられる。A/D 変換におけるサンプル間隔 τ 、計測における最大周波数 $\omega_{\max}$ 、テスト区間の分解数 N および、最小分

解能 Δx は互いにつぎのような関係がある。

定義式 $x' = C_0(1-M^2)t$ と (3c), (3d) 式より、

$$\Delta x = C_0(1-M^2)\tau/2 \quad (4a)$$

また、 N と Δx はつぎようになる。

$$N = L/\Delta x \quad (4b)$$

さらに、最大の τ はシャノンの定理より

$$\tau = \pi/\omega_{\max} \quad (4c)$$

となる。(4a), (4b), (4c) 式より、 τ , $\omega_{\max}$, N , Δx のうち一つが決まれば、他は自動的に決まる。

3. 短距離ガス管における実験結果とシミュレーション結果

2 章で述べたリーク場所推定に関する理論および方法の妥当性を検証するために、ここでは理論展開に用いた数学モデルに基づくシミュレーションと上で述べた方法による実験の結果を比較する。

3.1 実験システムおよび実験条件

Fig. 3 に示すガス管に空気を送り実験とシミュレーションを行った。以下、ガス管の定数を示す。

【ガス管に関する定数】 テスト区間の長さ $L = 58.84\text{m}$; ガス管の断面積 $A = 3.83 \times 10^{-4}\text{m}^2$; ガス管の分割個数 $N = 118$; 絞りの断面積 A に対する比率 $r = 0.05$; 絞りの厚さ $\Delta = 5\text{mm}$; 絞りの後方のガス管の長さ $\alpha L = 0\text{m}$

【ガスに関する定数】 ガスの密度 $\rho = 1.184\text{kg/m}^3$; ガスの粘度 $\eta = 1.82 \times 10^{-5}\text{kg}\cdot\text{s/m}^2$; 音速 $C_0 = 344\text{m/s}$; ガスの輸送速度 $v = 0\text{m/s}$

【リークに関する定数】 リークの直径 $d_i = 5\text{mm}$; リークに関する補正係数 $\kappa = 1$

【計測条件】

- (1) クロック周期 1ms の 10 段の M 系列信号をテスト信号として利用
- (2) (1) のテスト信号の増幅周波数範囲 110~350 Hz である。1ms 10 段の M 系列信号白

Fig. 3 Experimental system

- 色性は、この周波数範囲で制約されている。
- (3) 入出力端におけるマイクロフォンの意味のある周波数帯域はほぼ 80 Hz~10 kHz であり、(2)の周波数範囲で増幅されたM系列信号は問題なく計測できる。
- (4) リークの場所はつぎの4通り
- ① リークのない場合
 - ② $l=2.18\text{m}$ の場合
 - ③ $l=17.7\text{m}$ の場合
 - ④ $l=39.76\text{m}$ の場合

3.2 実験結果とシミュレーション結果の比較

上の条件のもとで、リーク場所①、②、③、④の場合について行った実験とシミュレーションの結果を Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6, Fig. 7 に示す。図(a)は実験結果、図(b)はシミュレーション結果である。以下、シミュレーション、実験結果の波形の大きさは同じ最大値をもつように正規化してある。

① Fig. 4のリークがない場合の波形では、出力絞りに相当する場所 $x'_2=58.8\text{m}$ ($L=58.84\text{m}$) に大きなパルスが観測される。 x'_2 の近くでは、実験結果とシミュレーション結果はよく似た波形を示している。 x'_2 以外の場所でもパルス状の波形は観測できるが、 x'_2 の場所のパルスほど顕著ではない。

② Fig. 5に示す $l=2.18\text{m}$ の場合は、リーク場所の近くで大きさ最大の正のパルスが観測される。実験結果とシミュレーション結果はよく似ている。実験から推定されたリークの場所は 2.39m であり、誤差は 21cm であった。

③ Fig. 6に示す $l=17.7\text{m}$ の場合は、絞りの近くでは実験とシミュレーションはよく似た波形を示す。リークの場所近くのパルス波形は実験結果のほうが滑

Fig. 4(a) Experimental result (no leak)

Fig. 4(b) Simulation result (no leak)

Fig. 5(a) Experimental result ($l=2.18\text{m}$) Fig. 5(b) Simulation result ($l=2.18\text{m}$)

らかである。しかし、双方共に同じ場所近くで負の大きなパルスが観測されている。実験結果から推定されたリークの場所は 18.0m である。その誤差は 30cm であり、最小分解能 $\Delta x=25.4\text{cm}$ より少し大きい。

④ Fig. 7に示す $l=39.76\text{m}$ の場合も絞りの近くではシミュレーションと実験結果はよく似ている。リ

ーク場所近くでは、実験結果のほうが滑らかな波形になっている。リーク場所近くで、いずれも正のパルスが発生している。実験から推定されたリークの場所は 39.8 m であり、その誤差は 4cm であった。

Fig. 6(a) Experimental result ($l=17.70$ m)

Fig. 6(b) Simulation result ($l=17.70$ m)

Fig. 7(a) Experimental result ($l=39.76$ m)

Fig. 7(b) Simulation result ($l=39.76$ m)

以上、リーク場所推定に使われる応答関数 $g(x')$ を実験とシミュレーションで求め、それらを比較した。両結果とも似た応答波形を示している。また、実験的に推定されたリークの場所は理論的に求める最小分解数以下あるいは、その近くの値の誤差しか含まない。このことより、このリーク場所推定法の基礎となる理論の妥当性が一応確認された。なお、この実験で用いたパイプは仮定 (A7) にもかかわらず、Fig. 3 に示すように 18 箇所円形の曲がりをもつが、この曲がりによる影響は実験では観測できなかった。

4. 長距離ガス管のリーク場所を精度よく推定するための計測条件の検討

長距離ガス管についてリーク場所が精度よく推定できるための計測条件を、2 章の数学モデルを利用したシミュレーションにより明らかにする。

ここでは、つぎのようなガス管を標準とする。

〔ガス管に関する定数〕 テスト区間の長さ $L=50$ km; リークの場所 $l=10$ km; ガス管の断面積 $A=0.785$ m²; ガス管の分割個数 $N=200$; 絞断面面積の A に対する比率 $r=0$; 絞りの厚さ $\Delta=5$ mm; 最大周波数 $\omega_{\max}=0.344$ Hz; 絞りの後の長さ $\alpha L=125$ m

〔ガスに関する定数〕 ガスの密度 $\rho=1.184$ kg/m³; ガスの粘度 $\eta=1.82 \times 10^{-5}$ kg·s/m², 音速 $C_0=344$ m/s; ガスの輸送速度 $v=0$ m/s

〔リークに関する定数〕 リークの直径 $d_i=5$ mm; リークに関する補正係数 $\kappa=1$

このガス管において、

- (A) テスト信号と圧力計測の周波数範囲を変える
- (B) テスト区間の両端の絞断面面積を変える
- (C) ある計測雑音下で、リークの大きさを変える
- (D) ガスの輸送速度を変える
- (E) ガス管の長さを変える

の 5 ケースについてシミュレーションを行う。ここで、計測における最大周波数 $\omega_{\max}$ は音響減衰を少なくするために超低周波に選んである。

【音圧計測の周波数範囲を変える場合】

入力端に加えるランダムテスト信号には、その周波数範囲に制限がある。周波数範囲を

- (a) $0 \sim 0.1 \times \omega_{\max}$; (b) $0 \sim 0.5 \times \omega_{\max}$
- (c) $0.2 \times \omega_{\max} \sim \omega_{\max}$; (d) $0.1 \times \omega_{\max} \sim \omega_{\max}$

の場合のシミュレーション結果を Fig. 8 に示す。高周波成分が計測できない場合、Fig. 8(a) のように応答は滑らかになる。 $0 \sim 0.5 \times \omega_{\max}$ の範囲で計測した場合の波形 Fig. 8(b) は Fig. 2(a) とよく似ている。逆に高周波成分だけを用了場合は Fig. 8(c), (d)

のようになり, Fig. 2(c), (d)のようなパルス状の波形になる. Fig. 8(d)のように $0 \sim 0.1 \times \omega_{\max}$ の成分をカットしただけで方形の波形が崩れ, 雑音に紛れる恐れがあり, 低周波領域における計測はリーク場

Fig. 8(a) Simulation result ($0 \leq \omega \leq 0.0344$ Hz)

Fig. 8(b) Simulation result ($0 \leq \omega \leq 0.172$ Hz)

Fig. 8(c) Simulation result ($0.0688 \text{ Hz} \leq \omega \leq 0.344 \text{ Hz}$)

Fig. 8(d) Simulation result ($0.0344 \text{ Hz} \leq \omega \leq 0.344 \text{ Hz}$)

所の推定精度向上のために重要である.

【テスト区間の両端の絞り断面積を変えた場合】

両端の絞りは, 管内音響定在波を立てるための反射板であり, リーク場所の推定上, 絞りが小さいほうが望ましいが, 逆に, 絞りを小さくするとガスの流通の妨げになる. 絞りのガス管の断面積に対する比率 r をつぎのようにし, この効果を調べる.

(a) $r=0.3$, (b) $r=0.9$

Fig. 9 の結果より, (a)のように絞りが小さいほうが波形に顕著な変化が確認されるが, (b)の結果から大きな絞りでもリーク場所は推定できる.

【リークの大きさを変えた場合】

入出力に S/N 比 100 の観測雑音を加え, つぎの円形リークの直径の場合でシミュレーションを行った.

(a) $d_l=0.5 \text{ mm}$, (b) $d_l=0.05 \text{ mm}$

結果は Fig. 10 に示す. これらの図から, (3c), (3e)式の $x'_2(=L)$ の場所では同じような大きさのパルスが現れるが, $x'_1(=L-2l=30 \text{ km})$ におけるステップの大きさはリークの大きさに比例する. シミュレーションでは直径 0.05 mm 程度のリークまでその場所の推定が可能であった.

ガス輸送速度 v を変えた ($v=0 \text{ m/s}$, 10 m/s , 20 m/s) 場合, ガス管の長さ L を変えた ($L=100 \text{ m}$, 1 km , 20 km , 50 km) 場合のシミュレーションを行った. v を

Fig. 9(a) Simulation result ($r=0.3$)

Fig. 9(b) Simulation result ($r=0.9$)

Fig. 10(a) Simulation result ($d_l=0.5$ mm) Fig. 10(b) Simulation result ($d_l=0.05$ mm)

変えた場合、乱流の発生により ρ に依存した周波数の乱れが存在するはずであるが、仮定(A3)で乱流項を無視したので、この影響は現れなかった。また L を変えた場合、ガス管の分割個数 N を $N=200$ と固定しており、それぞれの分解能は $L/200$ で与えられる。結果の図は省く。

5. 結 論

音響法によって長距離ガス管のリーク場所推定の可能性をシミュレーションで検討した。はじめ、ガス輸送中にリークが発生したガス管の音響数学モデル[(1)式, (2c)~(2e)式]を作り、音響法の理論を整理した。この音響法を長さ58.84mのガス管に適用するとして、シミュレーションと実験を行った。結果の応答波形は互いに類似しており、提案する音響モデル、音響法の妥当性が確認された。つぎに、このモデルを利用して、長距離ガス管についてシミュレーションを行った。この結果、テスト区間の入出力の圧力計測において、低い周波数領域での高精度の計測が精度

の良いリーク場所検出のために重要であることがわかった。

シミュレーションでは内径50cm、長さ50km、S/N比100程度で周波数範囲0~2.16 rad/sの計測で直径0.05mm程度の円形リークまでその場所を分解能 $\Delta x=250$ mで推定できることがわかった。

今後の課題は本論で設けた仮定[(A1)~(A7)]を外したより実的な検討を必要とする。

参 考 文 献

- 1) H. W. Decker: Pipeline Leak Detection Using Nitrous Oxide Method, Pap. Summ. ASNT. Natl. Conf. (U. S. A.), 177/189 (1979)
- 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: Surface Displacements Accompanying the Propagation of Acoustic Waves within the Underground Pipe, Journal of Sound and Vibration, 69-2 (1980)
- 4) 菅谷 茂: パイプラインの漏えいの検知と現状, 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, 169/176 (1979)
- 6) D. W. Huber: Real-time Transient Model for Batch Tracking Line Balance and Leak Detection, Journal Con. Pet. Technol., (CAN.) 20-3, 46/53 (1981)
- 7) T. P. Lindesay and J. C. Vanelli: Real-Time Flow Modeling, Rec. Conf. Pap. Annu. Pet. Chem. Ind. Conf. (U. S. A.) 28th, 189/192 (1981)
- 8) G. K. Schmid and G. Lappus: Dynamical Observers for State Reconstruction and Leak Detection in Natural Gas Pipeline Systems, Proc. Jt Autom Control Conf. (U. S. A.), TP6. E1/TP6. E2 (1980)
- 9) 渡辺, 十河: 気体輸送パイプラインの管内音響伝播特性を利用した漏えい位置の検知法, 計測自動制御学会論文集, 16-6, 885/890 (1980)
- 10) K. Watanabe: On Locating a Leak of Gas Transport Pipeline by an Acoustic Method, The J. of Fluid Control, 14-1, 39/55 (1982)
- 11) 渡辺嘉二郎: 長距離ガス輸送管のリーク場所の推定, 日本シミュレーション学会第5回シミュレーションコンファレンス, 7-2, (1985)
- 12) K. Watanabe and D. M. Himmelblau: Detection and Location of a Leak in a Gas-Transport Pipeline by a New Acoustic Method, 法政大学工学部研究集報, 21, 129/157 (1985)
- 13) 視聴覚情報研究会編 (大泉, ほか8名): 情報の科学Ⅲ音声の合成, (株)ラティス (1968)