音響法によるガスパイプラインのピンホール場所の推定[†]

渡 辺 嘉二郎*・小 山 弘**・田野口 宏**

Locating a Pinhole in a Gas-Pipeline via the Acoustic Method

Kajiyo WATANABE*, Hiroshi KOYAMA** and Hiroshi TANOGUCHI**

A new method based on an acoustic approach is described for locating a pinhole occurred in a gas pipeline. Increase or decrease in the pressure in a packed pipeline with a pinhole leads to the gas blow out or in from the pinhole by which sound noise with the wide frequency range is generated. The acoustic noise generated at the pinhole induces the standing waves in the pipeline just like as a flute. Modes of the standing waves are determined by the length of the packed pipeline and the site of the pinhole.

A mathematical acoustic model to describe the phenomena above was built and a method to locate a pinhole was presented by using the model. The method requires only one microphone which is set at a terminal in the packed pipeline. A simple algorithm applying the Fourier transformation to the acoustic signal detected by the microphone yields the accurate location of the pinhole site of the pipeline. Laboratory experiments verified the modeling and the location method.

Key Words: leak detection, pinhole location, acoustic method, line pack test, gas pipeline

1. はじめに

パイプラインによるガス輸送の歴史は長い。この輸送システムにはリークがつきもので、この正確で迅速な検出は古くからの問題である。リーク検出は住民等からの報告に基づき保全員がリーク現場に急行し、経験と勘に頼りリーク場所を特定することが多い。その

とき便利なセンサは実用化されているが、リーク、特にピンホールリークを遠くから推定する方策は実用化されていない。

パイプライン輸送は輸送対象、ライン規模、複雑さなどにおいて多様である。本論は工場、家庭パイプのような比較的短いガスパイプに焦点を絞る。計測条件が整えば長いパイプラインにも適用できるものとする。

リークの検出法はその問題の困難さにより、(1)リークの有無の検出、(2)パイプラインに沿って行う検査によるリークの場所の特定、(3)パイプラインの端点からのリーク場所の遠隔推定のレベルに分類できる。

(1)の代表例はラインバックテスト法¹⁾である。注目するパイプラインに高圧ガスを封入する。穴があるところからガスが漏れ減圧し、その圧力減少からリークの有無が検出できる。露出パイプの場合、接続部、溶接部などのリークの発生しやすい場所に石鹼水を塗り石鹼水のバブリングよりリーク場所も確認できる。パイプの上下流で流量を計測し、その不均衡からリークの有無を検出する方法²⁾もある。

(2)の例は自然界に存在しない物質を輸送ガスに混入し、その物質をライン沿に検出する方法³⁾、ピンホールからの高圧ガス吹き出し音の超音波成分は自然界に存在しにくく、この音を検出する方法^{4),5)}などがある。

(3)の方法には正確なパイプラインガス輸送数学モデルを作り、実ラインから計測した圧力、流量とモデル応答の差からリーク場所を推定する方法⁶⁾⁻⁹⁾がある。またパイプラインを巨大な管楽器と考え、パイプライン中の音響定在波モードがリークの影響を受けることに注目しリーク場所を検出する方法もある¹⁰⁾⁻¹³⁾。この音響を用いる方法ではパイプラインに音響雑音をテスト信号として加えている。この方法は穴の場所において定在波の音圧が節になることを利用しており、きわめて小さいピンホールではこの現象が起こりにくい。このためピンホール場所検出には限界がある。

[†] 第32回自動制御連合講演会で発表 (1989・10)

* 法政大学工学部 小金井市梶野町 3-7-2

** 法政大学大学院 小金井市梶野町 3-7-2

* Faculty of Engineering, Hosei University, Koganei

** Graduate Student, Hosei University, Koganei
(Received January 31, 1990)

(Revised September 18, 1990)

パイプライン敷設状況を考えるとき、現在の技術レベルではすべての状況に適用できるリーク場所推定法はない。ここでは、①ラインバックテストが可能、②パイプ内の気体の状態が均一、③分岐・合流がないパイプ、④検査員がパイプラインに沿って検査しにくいパイプのピンホール場所の推定に有用な方法について述べる。

2. パイプラインシステムと問題の記述

2.1 パイプラインシステム

Fig. 1 にピンホールをもつパイプの概要を示す。

パイプはラインバックされ両端は閉じている。パイプ内圧はポンプにより加圧あるいは減圧されている。このときピンホールからガスが吹き出すか入り込み、これに伴い周波数帯域の広い音響雑音が発生する。この雑音はパイプ内部に音響定在波を誘発し、そのモードはバックパイプの長さからピンホールの場所から定まる。この音響信号をパイプ内の一端に設置したマイクロホンで計測し離散化し計算機に取り込む。

はじめこのラインバックパイプ、および音響計測に関する変数、定数を定義しておく。

[パイプに関する定数]

L : ラインバックパイプの長さ

A : パイプ内の断面積

[リークに関する定数]

l_1 : マイクロホン設置端からピンホールまでの距離

l_2 : ピンホールから他端までの距離

A_i : ピンホールの断面積

κ : 補正係数

Z_i : ピンホール音源の内部インピーダンス

$u_i(t)$: ピンホール内における体積速度

$u_{i1}(t)$: パイプ内ピンホール左側の体積速度

$u_{i2}(t)$: パイプ内ピンホール右側の体積速度

$p_e(t)$: ピンホールを無負荷にしたときの仮想音圧

$p_i(t)$: ピンホールの場所における音圧で、 $p_e(t)$, Z_i

および $u_i(t)$ から定まる音圧

[ガスに関する定数]

ρ : ガスの密度, C_0 : 音速

[音響伝搬に関する変数]

$u_1(t), u_2(t)$: パイプの両端の体積速度

$p_1(t), p_2(t)$: パイプの両端の音圧

t : 時刻, ω : 周波数

[計測に関する定数]

τ : サンプル間隔

N : 分解個数 ($= L/\Delta x$)

N_s : サンプルデータ数

$f_{\max}$: 最大周波数 ($= 1/2\tau$)

Δx : 最小分解能 ($= C_0\tau/2$)

2.2 仮定と問題の記述

考える Fig. 1 のパイプにつきのような仮定を設ける。

(A1) パイプはラインバックされ閉鎖されている。

(A2) パイプ内のガスの温度、圧力は均一であり理想気体として取り扱え、音速 C_0 はあらかじめわかる。

(A3) パイプの断面積は一樣で、分岐や合流はない。

(A4) ピンホールは 1 カ所にしかない。

(A5) ピンホールの無負荷状態の仮想音圧 $p_e(t)$ は白色雑音とし、この穴から発生する雑音以外の雑音は少ない。

パイプラインのリーク検出法の一つとしてラインバック法はよく使用され、仮定 (A1) の状況は作れる。仮定 (A1) よりパイプ内ではガス移動がなく温度、圧力は均一で、内圧を大幅に上げない限り理想気体として取り扱える。またガスの種類、温度、圧力が変わると音速が計算でき仮定 (A2) は満たされる。しかし、音速に推定誤差が含まれる場合、その分だけピンホール場所の推定に誤差が生じる。したがってできるだけ正確に音速を推定する必要がある。

パイプラインは分岐や合流をもつが、パイプの閉鎖場所の選び方により仮定 (A3) を満たす状況を作れる。また同時に複数個のピンホールが発生する確率は低く仮定 (A4) は満たされる。テスト時間帯をうまく選び環境を整えることで (A5) の状況も容易に作れる。

ここで考える問題は、Fig. 1 に示し、仮定 (A1) ~ (A4) を満たすパイプラインにおいて、パイプ内の一端に設置したマイクロホンで計測した音圧よりピン

Fig. 1 Sketch of a packed pipeline with a pinhole

ホールの場所を推定することである。

3. ピンホールの場所の推定法

Fig. 1 のパイプの音響モデルは Fig. 2 に示す四端子回路網で表わすことができる。パイプの内部の気体は仮定 (A2) を満たし、パイプ内の音響現象はパイプの中心軸上の 1 次元波動方程式で記述できる。この 1 次元波動方程式をフーリエ変換し、整理すると、ピンホール発生場所からパイプの左端、また右端までの周波数特性はつぎの伝達行列で表わされる¹²⁾。以下、 $p(i\omega)$, $u(i\omega)$ はそれぞれ $p(t)$, $u(t)$ のフーリエ変換とする。

$$\begin{bmatrix} p_1(i\omega) \\ u_1(i\omega) \end{bmatrix} = \mathbf{F}(i\omega, l_1) \begin{bmatrix} p_i(i\omega) \\ u_{i1}(i\omega) \end{bmatrix} \quad (1a)$$

$$\begin{bmatrix} p_2(i\omega) \\ u_2(i\omega) \end{bmatrix} = \mathbf{F}(i\omega, l_2) \begin{bmatrix} p_i(i\omega) \\ u_{i2}(i\omega) \end{bmatrix} \quad (1b)$$

ここで伝達行列 $\mathbf{F}(i\omega, x)$ はつぎのように与えられ、

$$\mathbf{F}(i\omega, x) = \begin{bmatrix} \cos \frac{\omega x}{C_0} & -i \frac{\rho C_0}{A} \sin \frac{\omega x}{C_0} \\ -i \frac{A}{\rho C_0} \sin \frac{\omega x}{C_0} & \cos \frac{\omega x}{C_0} \end{bmatrix} \quad (1c)$$

ピンホールの場所での音圧は次式で与えられる。

$$p_i(i\omega) = p_e(i\omega) - Z_i \cdot \{u_{i1}(i\omega) + u_{i2}(i\omega)\} \quad (2a)$$

さらにピンホール音源の内部インピーダンス Z_i は次式で与えられる¹³⁾。

$$Z_i \left(\frac{\text{音圧}}{\text{体積速度}} \right) = i\omega \rho \frac{8\kappa}{3\pi^{3/2} \sqrt{A_i}} \quad (2b)$$

また仮定 (A1) よりパイプの両端は閉じており

$$u_1(i\omega) = 0, \quad u_2(i\omega) = 0 \quad (3)$$

となる。上式より、変数 $u_i(i\omega)$, $u_{i1}(i\omega)$, $u_{i2}(i\omega)$, $p_i(i\omega)$ を消去し、パイプのマイクロホン設置端における音圧 $p_1(i\omega)$ と $p_e(i\omega)$ の関係を求めるとつぎのようになる。

$$p_1(i\omega) = \frac{1}{\cos \frac{\omega l_1}{C_0} - \frac{8\omega \kappa A}{3\pi^{3/2} \sqrt{A_i} C_0} \cdot \frac{\sin \frac{\omega L}{C_0}}{\cos \frac{\omega l_2}{C_0}}} p_e(i\omega) \quad (4)$$

ピンホールの断面積はきわめて小さいので分母の第 2 項は第 1 項に比較して大きく、第 1 項を無視すると

$$p_1(i\omega) \approx -\frac{3\pi^{3/2} \sqrt{A_i} C_0}{8\omega \kappa A} \cdot \frac{\cos \frac{\omega l_2}{C_0}}{\sin \frac{\omega L}{C_0}} p_e(i\omega) \quad (5)$$

となる。上式より、 $p_1(i\omega)$ は $\sin(\omega L/C_0)$ を分母に含みつぎの周期ごとに大きなパルスが現れる。

$$W_L = \frac{2\pi C_0}{L} \quad (6)$$

仮定 (A2) より C_0 の値がわかっているのでパイプの長さ L は (6) 式よりつぎのように推定される。

$$L = \frac{2\pi C_0}{W_L} \quad (7)$$

(5) 式の $p_1(i\omega)$ に $\sin(\omega L/C_0)$ を掛けてパワースペクトルを求めるとつぎのようになる。

$$\left| \sin \frac{\omega L}{C_0} p_1(i\omega) \right|^2 = \frac{1}{2} \left\{ \frac{3\pi^{3/2} \sqrt{A_i} C_0}{8\omega \kappa A} \right\}^2 |p_e(i\omega)|^2 \left(1 + \cos \frac{2\omega l_2}{C_0} \right) \quad (8)$$

仮定 (A5) より $p_e(t)$ は白色雑音であり、このパワースペクトルは一定になる。したがって (8) 式は直流成分と周期 $(\pi C_0/l_2)$ の成分をもつ周期的周波数応答である。この周期に距離 l_2 が含まれる。(8) 式をフーリエ逆変換した時間応答、すなわち

$$g(t) = \mathcal{F}^{-1} \left[\left| \sin \frac{\omega L}{C_0} \cdot \mathcal{F} \{p_1(t)\} \right|^2 \right] \quad (9)$$

$\mathcal{F}[\]$ はフーリエ変換、 $\mathcal{F}^{-1}[\]$ は逆変換はつぎの時刻 t_i において正のパルスをもつ。

$$t_i = \frac{2l_2}{C_0} \quad (10)$$

これより、両端を閉鎖したパイプの一端で計測した音響波 $p_1(t)$ に (9) 式の処理を施し求めた時間応答 $g(t)$ の正のパルス発生時刻 t_i から、ピンホールの場合 l_1 は

$$l_1 = L - l_2 = L - \frac{C_0 t_i}{2} \quad (11)$$

Fig. 2 Mathematical acoustic model of the pipeline

Fig. 3 Experimental system

と求められる。

4. 実験による検証

4.1 実験システム

3章のピンホール場所の推定方法によってピンホール場所が推定できるか、またその特性を確認するために実験を行った。実験システムを Fig. 3 に示す。使用したパイプは仮定(A1)～(A4)を満たし、実験条件はつぎのとおりである。

〔パイプ〕 パイプは塩化ビニール製であり、長さ 200.0 cm、内径 50 mm (断面積 $A=1,963. \text{ mm}^2$)、肉厚 5 mm である。

〔ガス〕 ガスは空気とした。定数はつぎのとおり、密度 $\rho=1.184 \text{ kg/m}^3$ 、温度 $T=15.5^\circ\text{C}$ (24.0°C の場合あり)、音速 $C_0=340.7 \text{ m/s}$ (345.7 m/s)。

〔計測条件〕 パイプ内の圧力は 0.7 気圧まで下げた。音圧は約 $1 \text{ mV}/\mu\text{Bar}$ (1 kHz において) のコンデンサマイクロホンで計測し、遮断周波数 96.5 Hz の 1 次のハイパスフィルタで直流分をカットし、5,000 倍し AD 変換した。サンプル間隔は、 $\tau=50 \mu\text{s}$ 、 $N=235$ 、 $\Delta x=0.85 \text{ cm}$ 、 $f_{\max}=10 \text{ kHz}$ 、 $N_s=4,096$ 。またフーリエ変換は FFT アルゴリズムを利用する。

4.2 ピンホール場所の推定

Fig. 4 にピンホールがない場合と直径 1 mm の円形ピンホールがある場合にパイプ内の一端で計測した雑音およびそのスペクトルを示す。ピンホールがある場合(b)の雑音レベルはない場合(a)に比較してきわめて大きくピンホールの存在は容易に判明できる。Fig. 4(c)に Fig. 4(b)のスペクトルを示す。周期的なパルス状の波形が観測される。この周期から(7)式に基づきパイプの長さを求めると $L=199.8 \text{ cm}$ と推定できた。このパルスが顕著に観測されるのは 0～2,000 Hz の周波数範囲であり、必ずしも仮定(A5)を満たしていない。

計測した雑音 $p_1(t)$ に FFT を施し周波数応答 $p_1(i\omega)$

(a) Acoustic noise in the pipeline when no pinhole occurs

(b) When a pinhole with 1 mm diameter occurs

(c) Spectrum of the acoustic noise in Fig. 5(b)

Fig. 4 Acoustic signal detected from a pipeline

を求める。同じ状態で複数周波数応答波形を求め、各周波数ごとに平均した平均周波数応答を $\overline{g}\{p_1(t)\}$ として(9)式の処理を施す。この処理により S/N 比が向上される。結果を Fig. 5, Fig. 6 に示す。(8)式よりパワースペクトル関数は直流分を含みこの成分が(9)式で計算される時間応答関数 $g(t)$ の初期値にきわめて大きな値を与え、それが初期時間帯の応答を乱す。この乱れは意味をもたず、Fig. 5, Fig. 6 では初期時間帯5サンプルのデータを削除して示している。

Fig. 5 はいくつかの場所に一つのピンホールが発生

(a) When a pinhole occurs at $l_1=20.0$ cm (average of 10 samples)

(b) When a pinhole occurs at $l_1=80.0$ cm

(c) When a pinhole occurs at $l_1=140.0$ cm

した場合の時間応答 $g(t)$ である。(a)~(d)は10周波数応答波形の平均をとったものであり、(e)は(a)と同じ状態で20周波数応答波形の平均をとったものである。 $t_L=2l_2/C_0$ および $t_L=2L/C_0$ に対応する時刻で明らかなパルスが観測される。パルス発生時刻 t_L からピンホール場所を計算すると、それぞれ、 $l_1=20.0$ cm (20.0 cm), 80.0 cm (80.0 cm), 141.0 cm (140.0 cm), 180.0 cm (180.0 cm), 20.0 cm (20.0 cm) と求められた。()内は設定したピンホールの場所を示す。最大誤差は1分解能分 ($\Delta x=0.85$ cm) であった。

Fig. 5(a)~(d)より l_2 が L に近づくときに伴いパルスの大きさは小さくなる。しかし(a)と(e)と比較してみると、平均周波数応答の数を増やしたことでパルスがかなりシャープになっていることがわかる。したがって、入力端にきわめて近いピンホールを見つけるためには、静かな環境での長時間のデータを利用して、多数の周波数応答の平均をとって処理する必要がある。 $t_L=2L/C_0$ におけるパルスは、実験的に求めた $p_1(i\omega)$ に $\sin(\omega L/C_0)$ を乗じても L/C_0 の推定誤差の影響やこのポール近傍で大きくなるノイズ成分により $p_1(i\omega)$ のポールの $\sin(\omega L/C_0)$ を完全に相殺で

(d) When a pinhole occurs at $l_1=180.0$ cm

(e) When a pinhole occurs at $l_1=20.0$ cm (average of 20 samples)

Fig. 5 Time response $g(t)$ when a pinhole occurred at various sites

(a) Cross-sectional area of the pinhole is 0.79 mm² (b) Cross-sectional area of the pinhole is 0.50 mm² (c) Cross-sectional area of the pinhole is 0.28 mm² (d) Cross-sectional area of the pinhole is 0.20 mm²**Fig. 6** Time response $g(t)$ when a pinhole with various sizes occurs

きないためである。

Fig. 6 にさまざまな大きさのピンホールについての応答 $g(t)$ を示す。いずれも 10 周波数応答波形の平均周波数応答から得られたものである。リークの断面積が、それぞれ $A_L=0.79 \text{ mm}^2$, 0.50 mm^2 , 0.28 mm^2 , 0.20 mm^2 , リーク場所が $l_1=140.0 \text{ cm}$ の場合について実験を行った。それぞれのピンホールの場所はすべて $140. \text{ cm}$ と推定される。パルスの大きさはリークの大きさに比例する。通常の実験室環境（ピンホールがない場合のパイプ内の音が Fig. 4(a) 程度）で計測できるピンホールは 0.28 mm^2 までで、めいりょうにパルスが観測できた。 $A_L=0.2 \text{ mm}^2$ 以下では $l_1=140. \text{ cm}$ の場所に相当する時刻でパルスは観測できたがその大きさは雑音と同じレベルであった。

$p_e(t)$ が仮定(A5)を満たさないような雑音の場合でもピンホールの場所は推定できる。

5. む す び

本論は、音響法を利用したガスパイプのピンホールの場所の推定法を提案し、その妥当性を実験的に検討した結果を述べた。

バックされたガスパイプのピンホールからのガス吹き出し音が誘発するパイプ内音響定在波の音響伝搬数学モデルを用い、パイプ内の一端に設置したマイクロホンで計測した音圧からピンホールの場所を推定する方法を提案した。この方法はパイプ内を加圧するか減圧するほか特別なテスト信号を必要としない。

この推定法によってピンホールの場所が推定できるか否か、どの程度のピンホールまで推定できるかを調べるために、実験室のパイプで実験を行った。利用したパイプの断面積は $1,963. \text{ mm}^2$ 、長さが 2 m の比較的短いものであったが、精度良くピンホールの場所が推定できた。また通常の実験室音響雑音の環境で計測した場合のピンホールの大きさは 0.28 mm^2 までであった。ピンホール場所に対応する時刻でシャープなパルスを得るためには、計測における S/N 比を大きくする必要がある。そのためにパイプ内の圧力を大きく減圧し、周囲の雑音レベルが小さいときに長時間計測すること、 L/C_0 の推定精度を上げ、(8)式の処理で(5)式の分母の $\sin(\omega L/C_0)$ を正確に相殺することなどが必要である。

この方法が何 m の長さのパイプまで適用できるかは、ピンホールから発生する雑音の大きさ、低周波のスペクトラムがどれだけ存在するか、音の減衰、周囲の雑音の大きさなどから定まる。適用可能なパイプの長さの限界を知るには、以上についてさらに詳細な検

討が必要である。

参 考 文 献

- 1) 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)
- 2) R. D. Philips and C. W. Crider：Minicomputers Used in Metering and Leak Detection System for Liquid Petroleum Products Pipeline, IEEE Trans. Industry Applications, **1A**-12-4, 341/348 (1976)
- 3) H. W. Decker：Pipeline Leak Detection Using Nitrous Oxide Method, Pap. Summ. ASNT. Natl. Conf. (U. S. A.), 357/359 (1978)
- 4) P. M. Heim：Leakage Detection on Buried Pipelines, Conf. Pap. Int. Pipeline Technol. Conv. (U. S. A.) 7th, 169/176 (1979)
- 5) 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)
- 6) D. E. Goldberg：Transient Leak Detection, Conf. Pap. Int. Pipeline Technol. Conv. (U. S. A.) 7th, 117/183 (1979)
- 7) 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)
- 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.), 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，**11**, 9/14 (1988)
- 10) K. Watanabe：On Locating a Leak of Gas Transport Pipeline by Acoustic Method, The Journal of Fluid Control, **14**-1, 39/55 (1982)
- 11) 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)
- 12) 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)
- 13) 鳥越，石井：音響インピーダンス式流速計，計測自動制御学会論文集，**26**-2, 145/150 (1990)