偏相関を用いたパイプ検査システム[†]

鳥 越 一 平*

Pipe Test System Using Partial Correlation Technique[†]

Ippei TORIGOE*

A new method utilizing sound is proposed for a non-destructive test of pipes. Random noise is transmitted from one end of a pipe and the sound pressure is picked up by a microphone at the other end. The output signal of the microphone is pre-whitened by an inverse filter and processed to calculate the partial auto-correlation (PARCOR) coefficients; the inverse filter which compensates the effects of the sound source and the microphone can be obtained from the PARCOR coefficients which are calculated in advance from the microphone signal for a straight pipe. Since the PARCOR coefficients give the set of reflection coefficients of a nonuniform acoustic tube represented as a series of sections with uniform area and equal length, the cross-sectional area function of the pipe is determined from the calculated PARCOR coefficients. An experimental apparatus was built and model experiments were performed for several pipes with an artificial defect, including a pipe with a partial plugging, a pipe with an extension of cross-sectional area and a pipe with an orifice in the wall. The results show that the cross-sectional area functions of pipes can be estimated by the proposed method.

Key Words : pipe test system, pipeline monitoring, sound propagation, partial correlation, non-destructive test

1. はじめに

音声分析の分野で声道断面積推定に用いられる偏相関 (PARCOR) 技術を利用したパイプ検査システムを提案する。

管の詰まり、穿孔、狭窄あるいは侵入水の停留などの異常を検出する必要はいろいろの領域で生じる。音を利用して管の異常を検出する方法がこれまでもいくつか提案されている^{1)~3)}。本報告の方法も音を利用した方法の一つであるが、管の両端で音を送受信することで、管軸に沿った断面積分布を推定できるという、ほかの方法に無い特徴を有する。管に沿って走査作業をすることなく、管全長にわたる情報が得られるので、管の状態の精査に先立って、精査すべき箇所を発見するための検査に適した方法とすることができる。

2. 原理

管の一端にスピーカーを取り付けて雑音を放射し、他端にマイクロホンを取り付けて音圧を検出する (Fig.1)。この音圧信号を、音源等の特性を補償する適当な逆フィルターに通した上で偏相関分析し、管軸に沿った位置の関数としての断面積を推定する。管内の詰まりや腐食は、断面積の異常な変化

として検出される。以下、管内の音の伝播モデルと偏自己相関関数について、本法の説明上必要な要点に簡単に触れた後、断面積推定の原理を説明する。

Fig.1 Principle of the proposed method

2. 1 管内の音響伝播モデル^{4)~5)}

断面積の変化する管を、区分的に断面積が一定で区間長さ (l) の等しい多数の区間の連続で近似する (Fig.2)。つまり、管を、短い円筒状の音響管が多数 (M 個) 連なったものと見なす。管軸を x 軸に取り、各区間内の座標を Fig.2 のように定める。この区間内を、 x 軸の正の方向に伝播する進行波の音圧を p_m^+ 、負の方向に伝播する逆進行波の音圧を p_m^- と書く。第 m 区間

Fig.2 Sound propagation through a nonuniform acoustic tube

[†] 第39回 SICE 学術講演会で発表(2000・7)

* 熊本大学工学部 熊本市黒髪 2-39-1

* Faculty of Engineering, Kumamoto University, Kumamoto-shi, Kumamoto

(Received November 26, 2001)

(Revised March 11, 2002)

と第 $m-1$ 区間の境界面における、音圧と体積速度の連続条件から、つぎの関係が成り立つ。

$$\begin{aligned} p_{m-1}^+(t+2\tau) &= (1+\mu_m)p_m^+(t) - \mu_m p_{m-1}^-(t-2\tau) \\ p_m^-(t) &= (1-\mu_m)p_{m-1}^-(t-2\tau) + \mu_m p_m^+(t) \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 τ は、音が区間の長さ l の半分を進むのに要する時間を表わす(c を音速として $\tau=l/2c$)。また、 μ_m は、隣り合う区間の断面積 S_m および S_{m-1} によって次式のように定義され、「反射係数」と呼ばれる。

$$\mu_m = \frac{S_m - S_{m-1}}{S_m + S_{m-1}} \quad (2)$$

第 m 区間と第 $m-1$ 区間の音圧の関係を信号流れ図の形に表わしたのが Fig.3 である。

Fig.3 Signal flow at the junction between sections m and $m-1$

2. 2 偏自己相関係数^{4),5)}

信号 $s(n)$ の p 次偏自己相関(PARCOR)係数 k_p は、間にはさまれた $(p-1)$ 個のサンプル値によって線形予測可能な部分を、それぞれ $s(n)$ と $s(n-p)$ から引き去った残差どうしの相関である。すなわち

$$k_p = \frac{\overline{\varepsilon_{fn}^{(p-1)} \cdot \varepsilon_{fn}^{(p-1)}}}{\left\{ \left(\overline{\varepsilon_{fn}^{(p-1)} \cdot \varepsilon_{fn}^{(p-1)}} \right)^2 \cdot \left(\overline{\varepsilon_{fn}^{(p-1)} \cdot \varepsilon_{fn}^{(p-1)}} \right)^2 \right\}^{1/2}} \quad (3)$$

ここで、 $\varepsilon_{fn}^{(p-1)}$ および $\varepsilon_{bn}^{(p-1)}$ は、それぞれ前向きおよび後ろ向きの予測残差で、その z 変換は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{fn}^{(p)}(z) &= S(z) \left\{ 1 + \sum_{i=1}^p \alpha_i^{(p)} z^{-i} \right\} \equiv A_p(z) S(z) \\ \varepsilon_{bn}^{(p)}(z) &= S(z) \left\{ z^{-(p+1)} + \sum_{i=1}^p \beta_i^{(p)} z^{-i} \right\} \equiv B_p(z) S(z) \end{aligned} \quad (4)$$

$A_p(z)$, $B_p(z)$ の間には、つぎの漸化式が成り立つ。

$$\begin{cases} A_p(z) = A_{p-1}(z) - k_p B_{p-1}(z) \\ B_p(z) = z^{-1} \{ B_{p-1}(z) - k_p A_{p-1}(z) \} \\ A_0(z) = 1, \quad B_0(z) = z^{-1} \end{cases} \quad (5)$$

信号から偏自己相関係数を求める処理は、Fig.4 のような格子形回路によって表現される。この回路は、入力信号の標本間の相関を順次引き去って、残差を白色化していく過程を表わしており、PARCOR 分析フィルターと呼ばれる。

一方、残差を入力とし、標本間に相関を順次付加して信号 s

(n) を合成していく過程を考えて、格子形フィルターで表現すると Fig.5 となる。この回路は、(反射透過形)PARCOR 合成フィルターと呼ばれる。

Fig.4 PARCOR analysis filter (C_i : correlator)

Fig.5 PARCOR synthesis filter

2. 3 断面積推定

Fig.3 を反復の単位とする音響信号の生成過程は、時間の基準を取り直して遅延を格子の下側に移せば、 $k_i = -\mu_i$ となっている点を除いて、Fig.5 とまったく同じ形で表わされる(このとき $z = e^{4\pi s}$ となる)。すなわち、PARCOR 合成フィルターは、音響管を短管の連鎖で近似したときの等価回路になっており、PARCOR 係数は区間境界での反射係数に対応している。このことは、音響管の一端から雑音を放射し、他端で音圧を検出してこの信号を偏自己相関分析すれば、音響管の反射係数がもとなり、さらに短管の断面積比が求まることを意味している。

人の声門から口唇までの声の通路=声道は、軸に沿って断面積の変化する音響管と見なすことができる。しかし、音声信号をそのまま PARCOR 分析しても、声道の断面積は正しく求まらない。音声信号には、声道だけでなく、口唇からの放射特性と音源の特性が反映しているためである。

音声信号においては、音源波形や放射特性を直接に知ることが難しいため、近似的な推定値を用いてプリエンファシスを施して偏相関分析が行なわれる。これに対して、管検査の場合には、スピーカーに入力する信号は自由に設定でき、また、全く断面積変化の無い直管について信号を測定することができる。断面積推定に必要な逆フィルターを、実際の装置について直接測定して求めることが可能な訳である。いま、断面積変化の無い直管を用いて、スピーカーに白色雑音を入力し、このときのマイクロホン出力から PARCOR 係数を求めると、これらの係数は、直管、スピーカーおよびマイクロホンの特性を反映したものとなる。ところで、Fig.4 の PARCOR 分析フィルターは、信号から標本間の相関を引き去って、残差を白色化するフィルターである。したがって、直管に対して計算した PARCOR 係数を用いて Fig.4 のフィルターを作れば、スピーカーやマイクロホンの特性を補償する逆フィルターが自動的に

構成される。

断面積推定法をまとめると以下ようになる。まず、検査したいパイプと同じ長さの直管を準備し、一端にスピーカーを取り付け、帯域制限された白色雑音を入力する。他端のマイクロホンで検出した音圧信号を偏相関分析し、得られたPARCOR係数を用いて逆フィルターを構成する。つぎに、検査したいパイプにスピーカーを取り付け、同じように白色雑音を入力する。他端で検出した音圧信号を上記の逆フィルターに通した後、偏相関分析を行なってPARCOR係数を求める。スピーカーやマイクロホンの特性は補償されているから、このPARCOR係数には、音響管に関する情報のみが含まれている。最後にPARCOR係数から短管の断面積比を計算し、管端の断面積を乗じれば、管全長にわたる断面積が求まる。

3. 実験

原理を確認するため、実験装置を作製してモデル実験を行った。長さ500mm、内径40mmの亚克力管二本を、ジョイント管で一本に接続して、被検査パイプとした。ジョイント用の管に、穴を開けたもの、断面積を変化させたものなど数種類を準備し、管の狭窄・拡大・穿孔を模擬した。管の一端には直径70mmのフルレンジスピーカーを取り付け、2kHzに帯域制限した白色雑音を放射した。他端は亚克力板で閉じし、この亚克力板に小孔を穿ってエレクトレットマイクロホンを取り付けている。マイクロホン出力信号のサンプリング周期は250 μ sである。4 τ = 250 μ sだから、この実験における短管モデルの区間長 l は約4.25cmとなる。

管の断面積を推定した結果をFig.6に示す。縦軸は、管の左端(マイクロホン側)の断面積で正規化した上で、半径に換算してある。PARCOR係数は隣り合う区間の断面積比に対応しており、各区間の断面積はマイクロホン側から順次決定されていく。推定されたPARCOR係数には少しずつばらつきがあるため、マイクロホンから離れるにつれて、推定断面積に誤差が累積する。直管のPARCOR係数のばらつきの標準標準偏差は、断面積比に換算して3.3%であった。Fig.6では、7.5%以下の断面積変化は、誤差であって実際の断面積変化ではないと判断し、 $\mu_m = 0$ と置き換える処理を施した。PARCOR係数の誤差が管によらず同じ正規分布をすると仮定すれば、断面積変化が無い時に誤って断面積変化があると判断する確率は約2%である。一方、約12%の断面積変化がある場合は90%の確率で、15%の断面積変化は99%の確率で検出することができる。

Fig.6中の実線は、真の半径を表す。直管 [Fig.6(a)] は当然として、狭窄 [同(b)], 拡大 [同(c)] について、おおよそ正しい断面積が推定できていることがわかる。側面に穴のある管は、PARCOR合成フィルターではモデル化できない。したがって、機械的に本法を適用した推定断面積は意味を持たない。しかし、Fig.6(d)に示すように、推定結果が実際の断面積と大きく食い違ってくるため、穴の存在とその大まかな位置を推定することが可能である。

Fig.6 Estimated and normalized radius. (a) straight pipe (diameter 40mm, length 1000mm), (b) pipe with a partial plugging, (c) pipe with an extension, (d) pipe with an orifice (diameter 8mm).

4. まとめ

偏相関を利用したパイプの検査手法を提案し、モデル実験を行なった。その結果、拡大・狭窄の在るパイプについて、管軸にそった断面積分布を推定できることが確かめられた。

声道の長さはおおよそ170mm程度であり、モデル実験の管長も約1000mmに過ぎない。実際の検査においては、これより遙かに長い管が対象となる。したがって、音波の減衰を偏相関分析のモデルに取り入れることが今後の課題となる。

参考文献

- 1) 小山, 渡辺: 音響法による - ガスパイプラインの詰まりの推定, 計測自動制御学会論文集, 26 - 3, 259/265 (1990)
- 2) 真鍋, 小谷, 森光: 音響反射モデルに基づいた地下通信管路継手部の形状パラメータ推定, 計測自動制御学会論文集, 32 - 12, 1588/1595 (1996)
- 3) 田中, 渡邊: 配管内異常物体の位置, 厚みおよび断面積計測について, 計測自動制御学会論文集, 34 - 11, 1565/1573 (1998)
- 4) J.D.Markel and A.H.Gray, Jr.: *Linear Prediction of Speech* (Springer-Verlag 1976)
- 5) 斎藤, 中田: 音声情報処理の基礎 (オーム社 1981)