

I-10 音響反射モデルのインパルス表現からの管路形状近似再生と 地下通信管路の異常診断への応用

PIPE SHAPE RECONSTRUCTION ALGORITHM DIRECTLY FROM ACOUSTIC IMPULSE REPRESENTATION AND ITS APPLICATION FOR FAULT DETECTION

○真鍋 哲也¹・江口 正人²
 佐藤 昌彦³・小谷 忠司⁴
 ○Tetsuya MANABE¹, Masato EGUCHI²,
 Masahiko SATO³ and Tadashi KOTANI⁴

【抄録】通信管路の異常は地震や地盤の沈下など外的な要因のほか、腐食など経年変化によって発生する。これらの大部分は異常部位に形状の変化をとまうことから、管路内の異常形状を検出することは通信管路の検査に有効である。本論文では管路の音響反射特性をインパルス応答として同定し、そのインパルス応答から管路の各位置における反射率を近似的に推定することにより断面形状を再生する手法を提案する。また、数値シミュレーションおよび試作システムによる現場実験結果から通信管路の異常診断への適用について検証した結果について述べる。

【Abstract】 This paper describes a pipe shape reconstruction technique directly from impulse response of an acoustic reflection dynamics. Proposed algorithm is aimed to detect a fault of telecommunication conduit by an abnormal changes of cross sectional area. Example of pipe shape reconstruction is given, for a numerical simulation. We also show the results of field trial by our prototype acoustic inspection system for a telecommunication conduit damaged by the earthquake.

【キーワード】通信管路音響検査、音響反射システム、形状再生アルゴリズム、異常検出

【Keywords】 acoustic pipe inspection, acoustic reflection model, pipe shape reconstruction algorithm, fault detection

1. はじめに

通信ケーブルを収容する通信管路は地下に埋設された重要なライフラインの一つである。高品質な通信サービスを提供するうえで、これら地下通信管路の保守管理の重要性がより高まってきた。通信管路の異常は地震や地盤の沈下など外的な要因のほか、腐食など経年変化によって発生する。これらの異常は管路の種類によって異なるが、塩化ビニル製管路の場合は継手部の離脱による空隙の発生、もしくは土砂の流入による異常がほとんど

である。また、金属製管路の場合では継手部の離脱とともに錆びの成長による内径の減少が大多数をしめる。このように大部分の異常部位に形状の変化をとまうことから、管路内の異常形状を検出することは通信管路の検査に有効であるといえる。現在のところ小型のカメラを管路内に挿入し、その映像により通信管路内部の検査を実施しているが、カメラを管内に挿入するためには通常4～5名程度の作業が必要であり、検査コストが高いことから簡易な検査法が望まれている。

管路の簡易検査法として、現在までに多くの音響検査法が研究されている。特にガス輸送管内に発生するガス漏れやつまりの位置および程度の推定を目的とした音響検査法の研究が報告されている。^{1) 2) 3) 4)} これはM系列

¹ NTTアクセス網研究所(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)

² NTTアクセス網研究所(〒305 茨城県つくば市花畑)

³ NTTアクセス網研究所(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)

⁴ NTTアクセス網研究所(〒319-11 茨城県那珂郡東海村)

を音源として発生させた音響定在波からインパルス応答を推定し、異常発生位置に対応した時刻でのインパルス応答の振幅から異常程度を推定するものである。しかしながら、音響定在波からインパルス応答を推定するためには管路長に見合っただけの長時間の計測が必要である。われわれの検査対象である通信管路はその最大長が250mにもおよぶ長尺管路であるので取り扱う計測データが膨大になる。よって、通信管路の音響検査法としては、管路内の断面形状が変化する位置を容易に特定できる Fig.1に示すような音響パルスエコー法による検査法がより適していると考えられる。

その他の関連した研究として、線形予測法にもとづいた管路形状推定法が発声時における声道形状解析手法として報告されている。⁵⁾ これは唇で発生される音声から声道形状を逐次的に推定することを目的としている。線形予測法にもとづく形状推定法では声帯における駆動音が最終的に推定できるという特徴があり、駆動音に対応した入射波が観測できない場合の管路形状推定に有効である。しかしながら、パルスエコー法の場合は入射波と反射波が共に計測されるので、これらの間の関係を表わす音響反射システムを陽に同定することが可能である。よって、パルスエコー法による通信管路の音響検査を実現するためには入射波および反射波から音響反射システムを同定し、その同定したシステムより管路形状を推定する手法を新たに検討する必要がある。

本論文ではパルスエコー法における音響反射システムを入射波と反射波の間の関係を表わすインパルス応答として同定し、そのインパルス応答係数から直接的に通信管路の形状を再生するアルゴリズムを提案する。まず、管路のある片端における音響反射システムをインパルス応答表現によってモデル化する。この音響反射システムのインパルス応答係数は管路の形状変化により定義された反射係数により構成される。次に音響反射システムのインパルス応答係数から直接的に管路形状を近似再生するアルゴリズムを示す。線形予測法ではこの反射係数を逆ディジタルフィルタにより逐次的に推定をおこなうが、提案するアルゴリズムでは複数地点での多重反射波の振幅値が反射率を獲得したい地点のみでの反射した反射波の振幅値に比べて非常に小さくなることを利用することによりインパルス応答係数からの直接推定を実現している。最後にシミュレーションおよび試作システムによる現場実験により提案手法を検証した結果を示す。

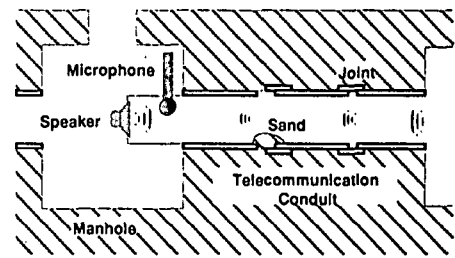


Fig.1 Acoustic inspection for an under ground telecommunication conduit by an acoustic pulse echo method.

2. 音響反射システムのインパルス応答表現

ここで、通信管路は断面積の変化をとまなう音響管であり、断面積の変化は Fig.2に示すように長さ L ごとに变化し、これが N 個接続されていると考える。この音響管モデルに対して以下の2つの仮定を設定する。

仮定 1: 管路は剛体であり管路の内径は管路内部を伝搬する音波の波長にくらべて十分小さいく管路内の音響伝搬は平面波で記述できる。

仮定 2: 気体の粘性および熱伝導による減衰は十分小さい。

これらの仮定と音圧および体積速度の連続性の関係より次式を得る。⁶⁾

$$p_i(t) + \bar{p}_i(t) = p_{i+1}(t + \frac{\tau}{2}) + \bar{p}_{i+1}(t - \frac{\tau}{2}) \quad (1)$$

$$S_i\{v_i(t) + \bar{v}_i(t)\} = S_{i+1}\{v_{i+1}(t + \frac{\tau}{2}) + \bar{v}_{i+1}(t - \frac{\tau}{2})\} \quad (2)$$

ただし、 $p_i(t)$ 、 $p_{i+1}(t)$ 、 $v_i(t)$ および $v_{i+1}(t)$ はそれぞれ、 i 番目の境界における進行波の音圧および粒子速度である。同様に $\bar{p}_i(t)$ 、 $\bar{p}_{i+1}(t)$ 、 $\bar{v}_i(t)$ および $\bar{v}_{i+1}(t)$ は後退波の進行波の音圧および粒子速度である。 t は時間変数、 $\tau = 2L/c$ は音速 c の音波が $2L$ だけ伝搬するのに必要な時間である。また、音圧および粒子速度の間には以下の関係がある。

$$p_i(t) = \rho c v_i(t) \quad (3)$$

$$\bar{p}_i(t) = -\rho c \bar{v}_i(t) \quad (4)$$

ただし、 ρ は体積密度である。式 (1)、式 (2)、式 (3) および式 (4) をまとめると次式を得る。

$$p_{i+1}(t) = (1 - r_i)p_i(t - \frac{\tau}{2}) + r_i\bar{p}_{i+1}(t - \tau) \quad (5)$$

$$\bar{p}_i(t) = -r_i p_i(t) + (1 + r_i)\bar{p}_{i+1}(t - \frac{\tau}{2}) \quad (6)$$

ここで、 r_i は i 番目の境界における進行波に対する反射率であり次式で定義される。

$$r_i = \frac{S_{i+1} - S_i}{S_{i+1} + S_i} \quad (7)$$

あり, h_i および η_i は次式のように表わされる.

$$h_i = \begin{cases} -r_0 & i = 0 \\ -(-r_i) \prod_{j=0}^{i-1} (1 - r_j^2) & i > 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$\eta_i = h_{i-1} \sum_{k=0}^{i-2} r_{i-k-2} (-r_{i-k-1}) \quad (17)$$

$$+ h_{i-2} \sum_{k=0}^{i-3} r_{i-k-4} (-r_{i-k-2}) (1 - r_{i-k-3}^2)$$

$$\vdots \quad \vdots$$

音源 $p_0(t)$ として単位インパルスを考えると, h_i は i 番目の境界のみで反射し他の境界を透過した時刻 τ_i に観測される反射波である. しかしながら, η_i は i 番目の境界より手前の境界で3回反射し同じく時刻 τ_i で観測される反射波となる. このように η_i には i 番目の境界における反射率 r_i が含まれず, η_i のオーダは h_i に比して小さいことがわかる.

3. インパルス応答係数からの管路形状再生

ここではインパルス応答係数 H_i から反射率 r_i を推定し管路の断面積の変化を推定することを考える. 式(14)に示した音響反射システムのインパルス応答表現から i 番目の境界における反射率 r_i は次式で再生できることがわかる.

$$r_i = h_i / \prod_{j=0}^{i-1} (1 - r_j^2) \quad (18)$$

$$= (H_i - \eta_i) / \prod_{j=0}^{i-1} (1 - r_j^2) \quad (19)$$

h_i は i 番目より手前の反射率から単純に計算できるが, η_i を計算するためには非常に多くの計算コストが必要である. しかしながら, η_i は h_i に $r_i r_j$ を乗じたものの総和になっていることから, η_i は h_i と比べると十分小さい値であると考えられる. ここでは h_i ではなく, 次式のように H_i より反射率 r_i を近似的に推定する.

$$\hat{r}_i = H_i / \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \hat{r}_j^2) \quad (20)$$

ただし, \hat{r}_i は i 番目の境界における推定反射率である. h_i の値が η_i より十分大きいとき, いいかえれば i 番目の境界における断面積の変化が大きいたまは反射率 \hat{r}_i の推定精度におよぼす η_i の影響は小さいと考えられる. しかしながら, η_i の値が h_i にくらべて無視できないときは, 反射率 \hat{r}_i の推定におよぼす影響は大きな誤差として現われる. この場合は i 番目の境界における反射率が, それ

より手前の反射率より小さいと考えられる. 管路の断面変化が一定のとき, すなわち $r_i = 0$ の場合と, それ以外の場合を考えると次式になる.

$$H_i = \begin{cases} h_i + \eta_i & \text{if } r_i \neq 0 \\ \eta_i & \text{if } r_i = 0 \end{cases} \quad (21)$$

h_i は i 番目の境界における反射率 r_i を含んでいるが, η_i は r_i を含んでいないことによるものである. このように真の断面変化が一定のとき, すなわち $r_i = 0$ のときは式(20)による反射率の推定は大きな誤差を含むことになる. 幸いにも η_i の値はもともと小さな値であると考えられることから, 大局的な形状再生を目的とする場合には η_i とともに値の小さな h_i を排除したほうが全体的な形状再生には有利であると考えられる. そこで, 次式に示すようなしきい値関数により小さな値のインパルス応答係数 H_i を排除する.

$$\hat{H}_i = f(H_i, \alpha H_{\max}) \quad (22)$$

$$H_{\max} = \max_{0 \leq i < N} |H_i| \quad (23)$$

ただし, \hat{H}_i は小さな値を排除したインパルス応答係数, H_{\max} はインパルス応答係数 H_i の最大値の絶対値である. α はしきい値定数で1より小さい正数である. $f(a, b)$ はしきい値関数で次式で定義される.

$$f(a, b) = \begin{cases} a & \text{if } |a| \geq b \\ 0 & \text{if } |a| < b \end{cases} \quad (24)$$

推定反射率 \hat{r}_i は式(22)により小さなインパルス係数を排除した \hat{H}_i をもちいて式(20)から以下のように求めることができる.

$$\hat{r}_i = \hat{H}_i / \prod_{j=0}^{i-1} (1 - \hat{r}_j^2) \quad (25)$$

反射率の定義式(7)より, 隣接した管路の断面積には

$$S_{i+1} = \frac{1+r_i}{1-r_i} S_i \quad (26)$$

の関係がある. 管路の音源位置における断面積 S_0 は既知であると考えられるから, 次式のように各位置における断面積, すなわち管路形状を推定することが可能となる.

$$\hat{S}_i = S_0 \prod_{j=0}^{i-1} (1 + \hat{r}_j) / (1 - \hat{r}_j) \quad (27)$$

4. シミュレーション結果

ここでは数値シミュレーションにより管路形状再生アルゴリズムの検証をおこなった結果を示す.

Fig.3のように断面形状が変化する管路でシミュレーションをおこなった. 上段, 下段の各数字は管路断面積

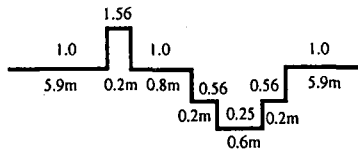


Fig. 3 Model shape of the pipe for numerical simulation.

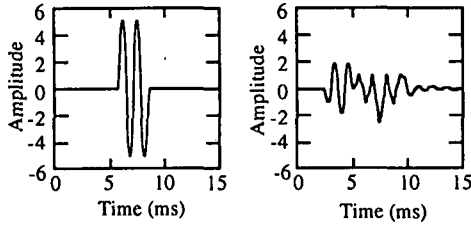


Fig. 4 Input wave for simulation and the corresponding reflection of the model pipe.

に対する面積比 S_i/S_0 、それが継続する長さをそれぞれ表わす。このモデル入射波に対する反射波の計算には、音速 $c = 343.4\text{m/s}$ 、サンプリング周波数 $f_s = 20\text{kHz}$ のときの反射率 r_i を事前に計算しておき式 (5)、式 (6) により求めた。シミュレーションにもちいた入射波形および反射波形を Fig.4 に示す。これらの波形が、それぞれ $p_0(t)$ と $\bar{p}_0(t)$ に対応する。入射波形は時間に対して 9 次多項式で表わされる $200\text{Hz} \sim 300\text{Hz}$ を基調周波数とした波形を用いた。インパルス応答係数 H_i の推定は入射波および反射波に離散フーリエ変換をおこない、それらの比を逆離散フーリエ変換することにより求めた。安定にインパルス応答を推定するために推定周波数帯域は 600Hz 以下とした。小さなインパルス応答係数を排除するためのしきい値関数は $\alpha = 0.5$ とした。これらの条件のもとで管路形状を再生した結果を Fig.5 に示す。計算にはサン・マイクロシステムズ社製の SPARC station 20 をもちいた。管路形状を再生した結果は、ほぼもとの形状に一致している。再生形状が少しなめらかになってのはインパルス応答を安定に計算するために周波数帯域に制限を設けたことによるものと考えられる。また、8m 以遠の再生断面の比が 1 より小さくなっているのは、反射率の推定誤差によるものと考えられる。

5. 実験結果

ここでは提案アルゴリズムを搭載した音響式通信管路検査システムの試作装置により、計測、形状再生した結果について述べる。

5.1 音響式管路検査システムの概要

音響式通信管路検査システムの試作装置を Fig.6 に示

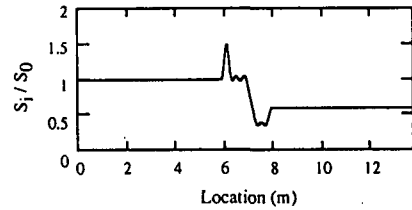


Fig. 5 Reconstructed pipe shape.

す。試作装置は計測プローブと計算処理および再生結果表示をおこなう装置本体から構成される。計測プローブには音源スピーカ、計測マイクロフォン、温度センサとそれらの増幅器を収納している。計測マイクロフォンの感度は -44dB ($0\text{dB} = 1\text{v/Pa}$ 1kHz) のコンデンサマイクを使用した。計測マイクロフォンは音源スピーカから発射される音波の進行方向に対して垂直に設置してある。これにより、入射音波と反射音波の音圧レベルを同じスケールで計測することができる。

音源スピーカの特性はダイアフラムの等価半径 40mm 、共振周波数 80Hz 、周波数帯域 18kHz である。検査対象管路の直径は 80mm および 83mm であることからこの音源はピストン音源となる。よって、管路内部の音響伝搬は平面波とみなすことができる。スピーカの前後は正と負の 2 重音源になることから最適なエンクロージャの容積を考える必要がある。ここでは、通信管路のダクト口にスピーカを設置することによりスピーカ前後の干渉を防ぐことができるので計測プローブの後部を意図的に開放してある。

本試作装置の操作および再生結果表示はタッチパネル付の液晶ディスプレイによりおこなう。計測プローブ、ディスプレイの制御および形状再生アルゴリズムの計算には Intel486DX4 (100MHz) を搭載したボードコンピュータをもちいている。マイクからの計測信号は A/D 変換されたのちこのボードコンピュータに取り込まれる。また、ボードコンピュータからのスピーカ制御信号は D/A 変換されたのちスピーカを駆動し音波を発生させる。ここで、A/D、D/A におけるサンプリング周波数はともに 20kHz である。

5.2 管路形状再生結果

試作システムにより実際に計測および形状再生を行った結果について述べる。計測を行った通信管路は平成 7 年に起きた兵庫県南部地震により被害を受けた通信用埋設管路である。パイプカメラで撮影した管路内の被害状況を Fig.7 に示す。これは、管路の継手部が地震により発生した外力により離脱し継手部周辺の土砂が流入した

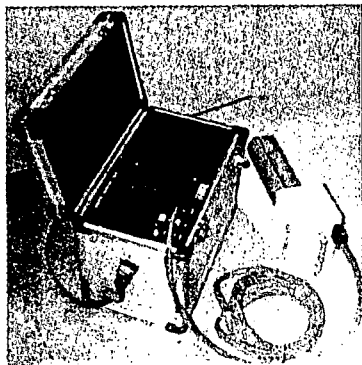


Fig. 6 Prototype acoustic inspection system for the underground telecommunication conduit.



Fig. 7 Images obtained using the camera scope of the telecommunication conduit damaged by the earthquake.

ことにより、継手部が狭くなったものと考えられる。この通信管路の音響検査にもちいた入射音波と Fig. 7 の被害位置からの反射音波を Fig. 8 に示す。Fig. 8 の入射音波および反射音波のデータから管路の形状再生を行った結果を Fig. 9 に示す。形状再生における条件は前節のシミュレーションと同じく音速 $c = 343.4 \text{ m/s}$ 、しきい値係数は $\alpha = 0.5$ とした。ただし、音速 c は計測プローブ付近の温度 $T = 20.0 \text{ }^\circ\text{C}$ から次式により算出したものである。⁷⁾

$$c = 331.45 \sqrt{\frac{273.0 + T}{273.0}} \quad (28)$$

形状再生結果より管路の断面積が大きく減少しているようすが確認できる。これは、パイプカメラ映像から確認できた異常状態とよく一致している。提案した管路形状再生アルゴリズムは、インパルス応答係数から近似的に反射率を推定した結果より形状再生をおこなうことから、正確な形状再生は困難である。しかしながら、実際に起こりえる管路の異常は管路形状に大きな異常を伴うことから、管路の簡易異常診断には適用可能であることが確認できた。

6. おわりに

本論文では、管路における音響反射システムのインパ

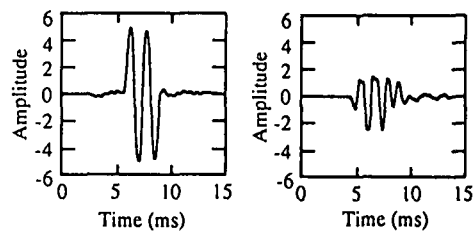


Fig. 8 Input and corresponding reflected waves from the damaged part of the telecommunication conduit by earthquake.

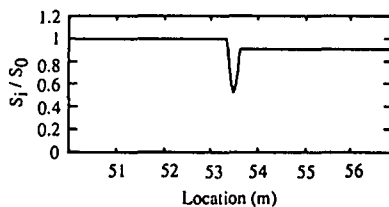


Fig. 9 Reconstructed shape of the telecommunication conduit damaged by the earthquake.

ルス応答係数より直接的に管路形状を再生するアルゴリズムを提案し、シミュレーションにより大域的な形状再生が可能であることを示した。また、本アルゴリズムは比較的計算量が少ないことから、パソコン程度の処理能力を備えた音響検査システムを試作し、実際に被害を受けた通信管路において現場実験を行った。通信管路の異常部位における形状再生結果がパイプカメラ映像から読み取れる状態とよく一致したことから、提案した管路形状近似再生アルゴリズムを管路の異常診断へ適用できることが確認できた。

謝辞

本論文をまとめるにあたり多大なご助言と励ましをいただきました。NTT アクセス網研究所小山田部長、葦田部長ならびに森光リーダに感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 渡辺嘉二郎, 小山弘, 田野口宏: “音響法による輸送管内の詰まりの検出”, 計測自動制御学会学術講演会予稿集, 333/334 (1989)
- 2) 小山弘, 渡辺嘉二郎, 田野口宏: “片端情報からの輸送管内の故障検出”, 計測自動制御学会学術講演会予稿集, 311/312 (1990)
- 3) 渡辺嘉二郎, 小山弘, 田野口宏: “音響法によるガスパイプラインピンホール場所の推定”, 計測自動制御学会学術講演会予稿集, 313/314 (1990)
- 4) 渡辺嘉二郎, 小山弘, 田野口宏: “音響法によるパイプラインにおけるピンホール場所の推定”, 計測自動制御学会学術講演会予稿集, 219/220 (1991)
- 5) Hisashi Wakita: “Direct Estimation of the Vocal Tract Shape by Inverse Filtering of Acoustic Speech Waveforms”, *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, Vol. AU-21, No. 5, 417/427 (1973)
- 6) 城戸健一: “基礎音響工学”, コロナ社 (1990)
- 7) 国立天文台編: “理科年表”, 丸善 (1993)