騒音下における管内定在波を用いた管長高精度計測について

田中正吾*・中山正行*

A High Accurate Pipe Length Measurement Under Noisy Environment Using Stationary Waves in the Pipe

Shogo TANAKA* and Masayuki NAKAYAMA*

The authors previously developed an accurate pipe length measurement system based on a dynamic system theory applied to the stationary waves in the pipe. In manufacturing fields, however, the system can not always be directly applied to the pipes with open ends, because extremely large noises outside the pipes invade into the pipes and cause successive phase shifts in the stationary waves.

The paper proposes a method which realizes an accurate pipe length measurement under such a noisy environment by selecting an optimal data window and also the optimal modes.

Key Words: pipe length measurement, stationary wave, noisy environment, linear dynamic system, maximum likelihood method

1. 納言

計測の分野においては、水道・ガスなどの配管関係を始めとし、管の長さを間接計測することが重要な役割を果たす場合がしばしば見られる。このような管長の間接計測法としてはパルスエコー法が良く知られている^{1),2)}。この方法は、管の一端より送波した音波が他端で反射し、再び返ってくるまでの往復音波伝播時間より管長を計測する方法であるが、送受波器（スピーカやマイクロホン）がダイナミクスを持つため、反射波は紡錘型振動波形となり、そのため、反射波の正確な立ち上がり時刻を求めることは雑音環境下では困難である。これに加え、音波の入力装置が必要であるため、高コストとなる。一方、パルスエコー法と異なる方式として、管内に定在波を発生させ、管長と定在波周波数の一対一関係より管長を計測する方法も報告されているが^{3),4)}、いずれも音波の入力装置が必要である。

このような観点から、著者らはこれまで、管に衝撃を与えたりして管内に発生する定在波を利用した管長高精度計測法を提案した^{5)~7)}。具体的には、管内に生じる定在波のいくつかのモードの音圧変動およびその時間微分を線形ダイナミックシステムの状態変数として採用し、このダイナミックシステムに管長および観測雑音分散を未知パラメータとしたカルマンフィルタおよび最尤法を適用することにより、管長をオンライン計測する方法を開発した。これにより、特別な入力

装置を使用することなく、0.2s程度の音圧変動データを用いるだけで、計測精度が0.1~0.2%位の高精度計測が実現できた⁵⁾。さらに、上記線形ダイナミックシステムを構成する定在波の最適モードの選択法を考えることにより、計測精度が0.01~0.05%のさらに高精度な管長計測法を開発した⁶⁾。

以上は、両端が閉の場合であったが、これに加えて、引き続き、両端あるいは一端が開の管に対しても、管長と開口端補正値を同時に高精度計測する手法を提案した⁷⁾。

しかしながら、両端が開の管に対し、鋼管製造ヤードにおけるように大きな外乱音が絶えず管内に入る場合には、以前のように鋼管をハンマーで叩いても、このときの衝撃音は外乱音に埋もれることになる。そのため、管内定在波の位相が頻繁に変わり、管内音圧変動を正弦波形によりモデル化することこれまでの計測方式では、必ずしも良好な計測結果が得られないことがあることがわかった。つまり、適当にとったデータウインドウに対し上記のように最適モードを選定しても、管内音圧変動の位相が外乱により何回も変化するため、計測精度が劣化することがわかった。

そこで、本論文では、外乱音が大きい場合には、以前のように管に衝撃を与えることにより生じる定在波を用いるのではなく、外部騒音によって管内に自然発生する定在波を積極的に利用する方式を提案する。具体的には、与えられた観測データの中から、最適なデータウインドウとそのとき使用するべき最適モードを同時に選択し、これらにこれまでの管長計測システムを適用することにより、高精度計測を実現する方式を提案する。合わせて、実験により提案方式の有効性を示す。なお、外乱音が小さい場合は、以前のように管にハン

* 山口大学工学部 宇部市常盤台 2-16-1

* Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube
(Received May 14, 2003)
(Revised February 4, 2004)

マーで衝撃を与え、これまでの計測システムをそのまま適用すれば高精度な管長計測が可能であることはいうまでもない。

2. 定在波を用いた管長計測システム

Fig.1 に示す両端が開の長さ L (m) の直管において、短い時間区間を考えれば、管内に生じる定在波の第 j モードの音圧変動 $x_j(t)$ は次式で表わされる。

$$x_j(t) = \alpha_j \sin(\omega_j t + \phi_j) \quad (j = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

ただし、 ω_j は両端開の直管に対する第 j モードの定在波の角周波数 $\omega_j = j \times 2\pi v / \{2(L + 2\delta)\}$ ($j = 1, 2, \dots$) を表わす。ここに、 v は管内音速である。また、 δ は開口端補正值であり、管の内径を r 、開口端補正係数を c としたとき、 $\delta = cr/2$ で与えられる⁸⁾。なお、開口端補正值 δ については、管とフロー（床）との距離がどのような値をとろうと、以前提案の手法⁷⁾により高精度に計測することができるので、ここでは議論の簡潔さのため既知とする。

いま、管内音圧変動 $z(t)$ を3つの定在波モードの一次結合で近似する。つまり、使用モードの集合として $\Omega = \{i_1, i_2, i_3\}$ を考えれば、管内音圧変動 $z(t)$ は次式で表わされる。

$$z(t) = \sum_{j \in \Omega} x_j(t) \quad (2)$$

このとき、上記の各定在波モードの音圧変動は $d^2 x_j(t)/dt^2 = -\omega_j^2 x_j(t)$ ($j \in \Omega$) なる微分方程式を満たすので、状態ベクトルを $\mathbf{x} = (x_{i1}, \dot{x}_{i1}, x_{i2}, \dot{x}_{i2}, x_{i3}, \dot{x}_{i3})^T$ と定義すれば、これら音圧変動に対し、つぎのダイナミック方程式が得られる。

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{w}(t) \quad (3)$$

ここに、

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 & O & O \\ O & A_2 & O \\ O & O & A_3 \end{bmatrix}, \quad A_j = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{ij}^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

ただし、 $\mathbf{w}(t) = (0, w_1(t), 0, w_2(t), 0, w_3(t))^T$ は遷移雑音であり、 $w_j(t)$ ($j = 1, 2, 3$) はそれぞれ平均値ゼロ、分散 σ^2 の互いに独立な白色ガウス雑音である。

いま、未使用の定在波すべてとセンサ本来の雑音を加えたものを観測雑音 v_k と見なせば、管内の音響センサにより与えられる観測方程式は、上記の状態ベクトルを用いてつぎのように表わされる。

$$y_k = \mathbf{h}\mathbf{x}_k + v_k \quad (k = 0, 1, 2, \dots) \quad (5)$$

Fig. 1 Stationary waves in the pipe with two open ends

ただし、 $\mathbf{h} = (1, 0, 1, 0, 1, 0)$ であり、 $\mathbf{x}_k$ は k サンプルング時刻における状態ベクトル $\mathbf{x}(k\Delta T)$ の意である。

なお、文献6)に示したように、多数のモードの定在波を加え合わせたものは、白色ガウス雑音と仮定できるので、以下では、 v_k を平均値がゼロ、分散が V の白色ガウス雑音として議論を進める。

2.1 管長のリアルタイム計測法

前節のようにして、管内音圧変動の線形ダイナミックシステムによるモデル化がなされたが、同システムにおいて、管長 L および観測雑音分散 V は共に未知である。したがって、これら2つの未知パラメータをまとめたベクトル $\boldsymbol{\theta} = (L, V)^T$ を定義し、実現した音圧変動に最も近接できる音圧変動を生成できるパラメータ $\boldsymbol{\theta}$ を探索すれば、これにより管長 L が計測できることになる。つまり、つぎの尤度関数を最大化することにより $\boldsymbol{\theta}$ を求めれば、管長計測がなされる^{5), 6)}。

$$J(\boldsymbol{\theta}) = p(\mathbf{y}, \boldsymbol{\theta})$$

$$= \prod_{k=1}^K p(y_k / \boldsymbol{\theta}, Y^{k-1}) \quad (6)$$

ここに、 $p(y_k / \boldsymbol{\theta}, Y^{k-1})$ は観測情報 $Y^{k-1} \triangleq \{y_j; 0 \leq j \leq k-1\}$ およびパラメータ $\boldsymbol{\theta}$ のもとでの観測値 y_k の条件付き確率密度関数を表わす。また、 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_K)^T$ である。

したがって、計測に際しては、適切なデータウインドウおよびそのときの使用モードが決まれば、 $\boldsymbol{\theta}$ を仮定した上記ダイナミックシステムにカルマンフィルタ⁹⁾を適用し、これにより求まる尤度関数(6)式の $\boldsymbol{\theta}$ についての最大化により管長の計測がなされることになる^{5), 6)}。なお、その際、カルマンフィルタを適用するため、(3)式を離散形に置き換える必要がある。

なお、上では L と V を未知パラメータとしたが、実際の計測に際しては、 V は、適当な値を与え定数として差し支えないことがわかっており⁵⁾、以下では、簡単のため未知パラメータは L だけとして話を進める。

本章では、管内定在波を邪魔する騒音のもとでの管内定在波を用いた管長の高精度計測を実現するため、与えられた観測データに対し、最適ウインドウおよびそのときの最適モードを自動決定する方法について述べる。

3. 最適データウインドウおよび最適モードの決定法

先の研究においては、管長の高精度計測の観点から、ダイバージェンス規範により線形ダイナミックシステムにおいて採用する定在波最適モードの決定を考えた。つまり、フィッシャーの情報行列¹⁰⁾ (いまの場合はスカラー)

$$K(L) = \int \left[\frac{\partial}{\partial L} \ln p(\mathbf{y}, L) \right] \left[\frac{\partial}{\partial L} \ln p(\mathbf{y}, L) \right]^T \times p(\mathbf{y}, L) d\mathbf{y} \quad (7)$$

の最大化により最適モードを求めた⁷⁾。ここに、 $p(\mathbf{y}, L)$ は

観測値をまとめたベクトル $\mathbf{y}$ が従う確率密度関数を表わす。フィッシャーの情報行列は、結局は、対数尤度関数 $\ln p(\mathbf{y}, L)$ を真値 L の近傍で二次関数近似したときの二次の係数に相当するため、これまでの情報行列最大化による最適モード選択は、結局は、対数尤度関数 $\ln p(\mathbf{y}, L)$ が急峻なモードの選定と等価となる。ただ今回は、モードの選定だけでなく、ウインドウの選定も新たに加わったことになる。

参考のため、上記の等価性を以下に示す。まず、 $\mathbf{y}$ の従う確率密度関数を

$$p(\mathbf{y}, L) = \frac{1}{(2\pi)^{K/2} |V|^{1/2}} \times \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{y} - \beta(L))^T V^{-1} (\mathbf{y} - \beta(L)) \right] \quad (8)$$

とする。計測に使用するデータウインドウは短いため、この時間内では定在波はほとんど減衰しないと思われるので、 $p(\mathbf{y}, L)$ を (8) 式のように表わしたとき、 β は使用したモード周波数に対応する正弦波の和をサンプリングしたもの（ベクトル）となる。もちろん、 L の関数となることは明らかである。このとき、 $\ln p(\mathbf{y}, L)$ を L の近傍で2次のオーダーまでテイラー展開すれば、

$$\ln p(\mathbf{y}, L) = -\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \beta}{\partial L} \right)^T V^{-1} \left(\frac{\partial \beta}{\partial L} \right) (\Delta L)^2 + (\mathbf{y} - \beta(L))^T V^{-1} \left(\frac{\partial \beta}{\partial L} \right) \Delta L + \text{const.} \quad (9)$$

一方、(7) 式の情報行列は次式で求まる。

$$K(L) = \int \left(\frac{\partial \beta}{\partial L} \right)^T V^{-1} (\mathbf{y} - \beta(L)) (\mathbf{y} - \beta(L))^T \times V^{-1} \left(\frac{\partial \beta}{\partial L} \right) p(\mathbf{y}, L) d\mathbf{y} = \left(\frac{\partial \beta}{\partial L} \right)^T V^{-1} \left(\frac{\partial \beta}{\partial L} \right) \quad (10)$$

よって、(9)、(10) 式より、情報行列と対数尤度関数の急峻度が等価となることがわかる。

これまでの計測方式では、単に、ある衝撃により管内に定在波を発生させたり、あるいは管内に自動発生した定在波を利用し、これら定在波を管内音響センサより抽出し管長を計測する方式であった。それゆえ、発生した定在波は通常ある時間だけ継続し消滅する。したがって、この時間内では、減衰が余りない範囲では、どのような長さのデータウインドウを採用してもよかったが、今回は衝撃による定在波あるいは自動発生している定在波は、管外からの入射騒音に打ち消されたり、あるいは外乱音のため管内定在波の位相が突変し、管内定在波を正弦波でモデル化し管長計測を行っていた先の提案方式では計測誤差が増大する。

そこで、ここでは、第2章で述べた尤度関数を用いて最適ウインドウおよび最適モードを同時決定することを考える。なお本論文では、先の等価性の事実から情報行列の代りに対数尤度関数の急峻度を活用し、尤度関数のピーク形状が鋭くなるデータウインドウおよびモードを選択することになる。

そして、求まったこれら最適データウインドウ、最適モードに対し、これまで著者らが開発して来た計測方式を採用することにより管長を計測する。

この方式では、フィッシャーの情報行列の最大化を図る方式に比べて別の利点もある。つまり、フィッシャーの情報行列は本来局所的なものであるが、尤度関数の形状をみて最適なデータウインドウおよびモードを選択する今回の提案方式では、計測に使えないデータの判定も可能となる。

つまり、物理的には、外乱音がない場合は定在波は厳密に基本モードの周波数の整数倍の周波数を持つため、尤度関数は常に単一のピークを持つ。ところが、外乱音により頻繁に大きな位相の突変が生じる場合は、(ウインドウ内で平均的に見た) 等価的周波数がシフトするため、おのおのの周波数が異なった管長に対する定在波モードとしての働きをなし、尤度関数（あるいは対数尤度関数）が複数のピークを持つことになる。なお、位相の突変が多数生じ、たまたま周波数シフトが打ち消し合い、尤度関数のピークがひとつになる場合も考えられるが、このような場合には尤度関数のピーク形状は必然的に緩やかとなる。これは、管長パラメータ L を多少変化させても、位相が頻繁に変化しているため、音圧モデルによりデータウインドウ内の音圧変動をある程度表わすことができるからである。

以上のことから、対数尤度関数がひとつのピークを持ち、かつこのピーク形状が最も急峻となるデータウインドウおよび定在波モードを最適なものとして選ぶことが合理的であることがわかる。

上記手法により求めた最適データウインドウと最適モードを用いて第2章の計測法を適用することにより、外乱音が開口端より入る開管の場合にも、管内定在波モードを効率的に抽出した管長高精度計測が実現されることになる。なお、本計測システムにおいては外乱音によって管内に生じる定在波を利用するため、外乱音のレベルが増大した場合でも、信号（使用モードの定在波）および観測雑音（未使用モードの定在波）が共に大きくなるだけで相対的な大きさは変わらない。したがって、外乱音の大きさが変わっても、管長高精度計測が可能である。ただ緒言でも述べたように、外乱音が小さい場合は、この方法よりハンマーで衝撃を与える以前の方法の方が有効である。

Fig. 2 Outline of the experiment

Fig. 3 Output of the sensor inside the pipe

Fig. 4 Output of the sensor outside the pipe (near the speaker)

4. 実験結果および検討

管長計測実験を Fig.2 に示す長さ 4,000mm, 内径 82mm の両端開の直管に対して行なった. なお, 本実験においては, 緒言で述べたように管に衝撃を与えるのではなく, 鉄鋼製造ヤードのようにかなり大きな騒音がある環境下を想定し, 管口に向けて約 100dB の外乱音を入力した. この際, 外乱音は図のようにセンサ位置とは異なる管端の方にセットしたスピーカより入射した. なお, 外乱音としては, 選択周波数を特定の局の周波数に同調させない状態のラジオ出力とした. また, 管を床から 700mm 離しておいたのは, 開口端補正を行なう際, 理想的な開口端に対する補正值 $c = 0.613$ が使用できるようにしたためである⁷⁾. さらに, 管内に設置した温度センサにより実験時の管内温度を測定したところ, 21.5°C であった.

上記の実験条件のもとで, 管内音圧変動データをサンプリング周期 $\Delta T = 0.2\text{ms}$ で 10s 間パソコンに収録した. このときの管内音響センサの出力波形および (参考のため) スピーカ側の管外に置いた音響センサの出力波形をそれぞれ Fig.3, 4 に示す. なお, 図には, 定在波の影響が見えやすいよう, 0.05s 間の音圧変動波形を示している. 実際, Fig.4 の波形と異なり, Fig.3 の波形には強い周期性がみられる. 参考のため, Fig.5, 6 に, これらの出力のスペクトルをそれぞれ示す. Fig.5, 6 より, 管内音圧変動は管外音圧変動 (この場合はスピーカからの直接音) と異なり, スペクトル図においても周期的な位置に急峻なピークがあることがわかる. つまり, 管内音圧変動に複数の定在波が含まれていることがわかる. なお, このときの理論的な基本モードの周波数は 42.5Hz であり, Fig.5 の急峻なピークはこの基本モード周波数の整数倍の位置にあることがわかる.

参考のため, Fig.7 に静寂な環境下での管に軽くハンマーで衝撃を与えたときの管内音圧変動のスペクトルを示すが, Fig.5, 7 より, 外乱音がある場合は, そうでない場合に比べて, 各モード周波数の近傍でスペクトルのピーク形状が比較的緩やかとなっていることがわかる. さらに, ピークの数が減ったり, あるいは余分なピークが現れたりしていることもわかる.

Fig. 5 Spectrum of the output of the sensor inside the pipe

Fig. 6 Spectrum of the output of the sensor outside the pipe

Fig. 7 Spectrum of the output of the sensor inside the pipe under no external noise

つぎに, 管内音響センサにより得られた 10s 間の観測データに対し, データウィンドウ長を 2s に固定し, データウイン

Fig. 8 A likelihood function for the optimal data window with the optiaml modes

ドウの開始時刻を0.1sずつシフトさせながら、対数尤度関数のピークの先鋭度が最大となるものを搜した。ただし、対数尤度関数の計算に際しては、第13モードを上限としたモードの中から3つの最適モードを選択することにした。なお、使用モードの上限を与えたのは、先の研究⁷⁾により、管の内径の8倍より短い波長の定在波を使用すると、管内平面波の仮定がこわれ、管長計測に誤差が生じることを考慮したからである。

この結果、先鋭度が最大となったのは、データウインドウの開始時刻が6.9s（つまり、データウインドウが $D^* = [6.9, 8.9]$ ）のときであり、かつこのときの最適モードは $\Omega^* = \{5, 8, 13\}$ となった。この最適なデータウインドウ D^* および最適な定在波モード Ω^* に対し第2章の計測システムを適用すると、管長の計測値は4.003mとなった。参考のため、このときの対数尤度関数の変化を、 $3.95 \leq L \leq 4.05$ (m)の範囲で描いたものがFig.8である。また、同様な実験を10回行なったときの計測値の平均値および平均値周りの標準偏差はTable 1のようになった。なお表には、参考のため、採取した10s間の音圧データの最初の2s間をデータウインドウとして用いたときの、以前提案の方法による計測結果もあわせて示す。

Table 1 Measurement results

	mean (mm)	SD (mm)
true	4,000	
proposed method	4,002	3.7
pre-proposed method	4,004	14.6

SD : standard deviation

表より、単にデータウインドウを適当なものに固定して最適モードモデルを使用するだけの方式に比べ、本論における提案方式のほうが格段に高精度な計測が行なえることがわかる。参考のため、Fig.9に、データウインドウを $[0, 2.0]$ としたものに以前提案の方式を適用したときの対数尤度関数の一例を示すが、適当にデータウインドウを選んだ場合、最適モードを使用しても、対数尤度関数のピークの尖鋭さは、提

Fig. 9 A likelihood function for a data window $[0, 2.0]$ with the optimal modes

案手法の場合（たとえば、Fig.8）に比較し大幅に減じることがわかる。なおここでは、データウインドウ長は2sとしたが、具体的な選定に当っては、適用対象ごとにあらかじめ実験などを行ない、最適なものを用いるようにすればよい。最後に、本実験では長さ4mの管に対して計測実験を行なったが、本計測システムにおいては、計測誤差は管内に発生する定在波モードの波長によって決まるため、内径が同じ管であれば、基本的には計測精度は管の長さに影響されない⁷⁾。

5. 結 言

これまで著者らは、両端が閉じた管あるいは静寂な環境下での（一端あるいは両端が開の）開管に対し、管内に発生した定在波を用いたシステム工学的発想による管長高精度自動計測法を提案して来たが、本論文では、尤度関数のピークが最も先鋭となるデータウインドウおよびそのとき定在波の最適モードを使用することにより、外乱音が開口端より管内に入り管内定在波に影響を与える場合でも、高精度な管長計測が行なえる計測システムを提案した。そして、実験により、本提案方式の有効性を確認した。

最後に、本研究の遂行に際し、ご協力を戴いた本学電気電子工学科岡本昌幸助手に謝意を表す次第である。

参 考 文 献

- 1) T. Manabe, S. Tomita and T. Yabuta : Acoustic Inspection System for Underground Telecommunication Conduit, Proc. of IMTC'94 (1994)
- 2) 佐藤, 田伊, 伊藤 : 音響を利用したパイプ長さ計測, 第36回自動制御連合講演会予稿集, 11/12 (1993)
- 3) 小山, 渡辺 : 音響法によるパイプラインモニタリング, 計測自動制御学会論文集, 29-3, 295/301 (1993)
- 4) 一宮, 坂本 : 音響信号を利用した管の長さ測定 (管内空気柱の共振周波数測定), 日本機械学会論文集, 57-539, 2217/2222 (1991)
- 5) 田中, 岡本 : 管内音圧変動を利用した管長オンライン計測, 計測自動制御学会論文集, 34-2, 78/86 (1998)
- 6) S. Tanaka and M. Okamoto: Dynamic Model Based Pipe Length Measurement Using Stationary Wave, Measurement, 28, 249/259 (2000)
- 7) 田中, 岡本 : 定在波を用いた両端開の直管に対する管長高精

度計測, 計測自動制御学会論文集, **38-10**, 821/828 (2002)

8) 小橋 豊: 基礎物理学選書 音と音波, 裳華房 (1969)

9) 有本 卓: カルマン・フィルター, 産業図書 (1977)

10) S. Kullback: *Information Theory and Statistics*, John Wiley and Sons (1959)

[著 者 紹 介]

田 中 正 吾 (正会員)

1976年, 九州大学大学院電気工学専攻博士課程修了. 同年同大学助手を経て, 80年山口大学工学部電子工学科助教授. 91年同大学電気電子工学科教授, 現在に至る. インテリジェント計測, 異常診断などの理論および応用研究に従事 (工学博士). 電気学会, システム制御情報学会などの会員. 中国文化賞 (2003), 文部科学大臣賞 (2004) などを受賞, 本会フェロー (2003).

中 山 正 行 (学生会員)

2004年山口大学大学院理工学研究科博士前期課程電気電子工学専攻修了. 現在, 日本製紙 (株) 勤務. 在学中は音響センサを用いた管長自動計測システムの開発に関する研究に従事.