定在波を用いた管長高精度計測のための最適センサ配置

岡 本 昌 幸*・リズキエフ ファルーフ*・田 中 正 吾*

Optimal Location of an Acoustic Sensor for an Accurate Pipe Length Measurement Using Stationary Wave

Masayuki OKAMOTO*, Farrukh RIZKIYEV* and Shogo TANAKA*

In the field of measurement, we often encounter the need to measure pipe lengths indirectly. We have developed an on-line pipe length measurement system with one acoustic sensor from the viewpoints of ease to be used in various applications and its cost. The system made use of the stationary wave generated by hitting the pipes or the one spontaneously generated in the pipes. The system realized a highly accurate measurement by modeling the stationary wave as state variables of a linear dynamic system and applying Kalman filters and maximum likelihood method.

The paper discusses the optimal location of the acoustic sensor to realize a much higher accurate pipe length measurement. Experiments will show the validity of the optimal sensor location.

Key Words: pipe length measurement, acoustic sensor, stationary wave, maximum likelihood method, divergence, optimal sensor location

1. 緒 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うけられる。管長の間接計測法としてはこれまでパルスエコー法^{1),2)}がよく知られているが、この方法は、雑音の影響などにより反射波（一般に紡錘型振動波形）の正確な立ち上がり時刻を求めることが困難なため、管長の高精度計測には不向きである。このような観点から、著者らは先に直管あるいは湾曲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れらの1回微分を状態変数とする線形ダイナミックシステムを導入し、これに管長を未知パラメータとするカルマンフィルタおよび最尤法を適用するリアルタイムの高精度管長計測システムを開発した³⁾。さらに、管長計測に際しては高次モードの定在波が高い分解能を持つことに着目し、ダイバージェンス規範を用い、状態変数として採用する最適モードの選択法についても考察した⁴⁾。

なお、これらの管長計測システムにおいては、これまでセンサ設置の容易さから、音響センサを管端に設置してきた。しかしながら、管内に生じる定在波の各モードの振幅は管軸方向の位置によって異なるため、センサの位置を変えれば、センサに観測される各モードの定在波の振幅も変わる。したがって、以前提案の計測システムにおいて、状態変数の大きさが変わるだけでなく、未使用モードの定在波をすべて合わせた観測雑音相当項の分散も変わることになる。したがって、SN比の観点から、信号分をできるだけ大きく、雑音分をできるだけ小さくするような位置に音響センサを配置すれば、それだけ計測精度が高められることになる。

このようなことに鑑み、本論文では、以前提案の管長計測システムにおいて、ダイバージェンスの観点から最適なセンサ配置について論じると共に、この最適センサ配置により管長の計測精度がさらに高められることを示す。

2. 管内音圧変動のモデル化について

ここでは、まず、両端が閉、開および一端が閉のそれぞれの場合について、順次、管内音圧変動のモデル化について論じる。

2.1 両端が閉の場合

Fig.1のように両端が閉じた長さ L の直管を考える。いま、管の左端を原点とした管軸方向の座標を ℓ とすれば、管内に生じる定在波の第 j モードの音圧変動 $z_j(\ell, t)$ は次式で

Fig. 1 A straight pipe with two closed ends

* 山口大学工学部 宇部市常盤台 2 丁目 16 番 1 号

* Faculty of Engineering, Yamaguchi University, Ube
(Received March 6, 2003)
(Revised August 18, 2003)

表わされる.

$$z_j(\ell, t) = \beta_j(\ell) \sin(\omega_j t + \phi_j) \quad (1)$$

$$\beta_j(\ell) = \alpha_j \cos(j\pi\ell/L) \quad (2)$$

ただし, $\beta_j(\ell)$ および α_j はそれぞれ ℓ の位置および管端 ($\ell = 0$) における第 j モードの定在波の振幅である. また, ω_j は第 j モードの定在波の角周波数であり, 管内の音速を V として $\omega_j = j \times 2\pi V / (2L)$ ($j = 1, 2, \dots$) により与えられる. 参考のため, Fig.1 に, 第1モード (基本モード) の音圧の空間分布を示す.

したがって, 管内音圧変動のモデル化に際し, 使用する定在波のモード番号の集合を Ω とすれば, 管端からの距離が ℓ の位置に音響センサを置いたときの観測値 $y(\ell, t)$ は, つぎのように表わせる.

$$y(\ell, t) = \sum_{j \in \Omega} z_j(\ell, t) + v(\ell, t) \quad (3)$$

ただし, $v(\ell, t)$ は, 未使用のすべての定在波モードの音圧変動およびセンサ本来の雑音をまとめたものであり, 先の報告同様⁴⁾, ここでは観測雑音とみなす. なお, この観測雑音は周波数の異なる多数の定在波モードの和であることから, 統計的に白色ガウス雑音に近い性質を持つので, ここでもこの観測雑音を白色ガウス雑音とみなす⁴⁾.

このとき, 先の計測システムと同様, 使用モードの個数を3とし, 使用モードの定在波の音圧変動 $z_j(\ell, t)$ ($j \in \Omega$) およびそれらの時間微分を状態変数とした状態ベクトル $\mathbf{x}(\ell, t) = (z_{i_1}(\ell, t), \dot{z}_{i_1}(\ell, t), z_{i_2}(\ell, t), \dot{z}_{i_2}(\ell, t), z_{i_3}(\ell, t), \dot{z}_{i_3}(\ell, t))^T$ を定義すれば, 使用モードの定在波にかかわる音圧変動に対し, 以下の状態方程式が得られる.

$$\dot{\mathbf{x}}(\ell, t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(\ell, t) + \mathbf{w}(\ell, t) \quad (4)$$

ここに, $\Omega = \{i_1, i_2, i_3\}$ であり,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_1 & O & O \\ O & A_2 & O \\ O & O & A_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$A_j = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{i_j}^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (j = 1, 2, 3)$$

である. ただし, $\mathbf{w}(\ell, t) = (0, w_1(\ell, t), 0, w_2(\ell, t), 0, w_3(\ell, t))^T$ はデータウィンドウ内の音圧変動のわずかな減衰を補償するために導入した遷移雑音であり, $w_j(\ell, t)$ ($j = 1, 2, 3$) 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とする.

さらに, 上記の状態ベクトル $\mathbf{x}(\ell, t)$ を用いれば, (3) 式の観測値はつぎのように表わせる.

$$y(\ell, t) = \mathbf{H}\mathbf{x}(\ell, t) + v(\ell, t) \quad (6)$$

ここに, $\mathbf{H} = [1, 0, 1, 0, 1, 0]$ である.

以上により, 両端が閉の場合について, 状態方程式および観測方程式がそれぞれ (4) および (6) 式で与えられる管内音圧変動の線形ダイナミックシステムが得られた.

2.2 両端が開の場合

つぎに, 両端が開の場合 (Fig.2 参照) を考える. このときの管端から距離 ℓ の点における第 j モードの定在波の音圧変動は次式で与えられる.

$$z_j(\ell, t) = \beta_j(\ell) \sin(\omega_j t + \phi) \quad (7)$$

$$\beta_j(\ell) = \alpha_j \sin\{j\pi(\ell + \delta)/(L + 2\delta)\} \quad (8)$$

ただし, $\beta_j(\ell)$ は ℓ の位置における第 j モードの定在波の振幅である. また α_j は, 先と同様, 第 j モードの定在波の腹に相当する位置における振幅である. さらに, ω_j は第 j モードの定在波の角周波数であり, 開口端補正値を δ とすれば, $\omega_j = j \times 2\pi V / \{2(L + 2\delta)\}$ ($j = 1, 2, \dots$) で与えられる. なお, 開口端補正値 δ は管の床からの高さにより異なる値をとるが, 文献5)の手法によりあらかじめ高精度に計測することができるので, ここでは既知のパラメータとして議論を進める.

結局, 状態変数として採用するモードの集合 Ω を与えれば, (4) および (6) 式と同様な音圧変動の線形ダイナミックシステムが得られる.

2.3 一端が閉の場合

一端が閉の場合は, 両端が閉および開の場合と異なり, 対称性がないため, 管内に生じる定在波の音圧変動の表現法が若干異なる. つまり, Fig.3 のように閉端を $\ell = 0$ とした場合は, ℓ の点における第 j モードの定在波の音圧変動は次式で与えられる.

$$z_j(\ell, t) = \beta_j(\ell) \sin(\omega_j t + \phi) \quad (9)$$

$$\beta_j(\ell) = \alpha_j \cos\{j\pi\ell/2(L + \delta)\} \quad (10)$$

ただし, $\beta_j(\ell)$ および α_j は, 先と同様それぞれ ℓ の位置および定在波の腹に相当する位置における第 j モードの振幅である. さらに, ω_j は第 j モードの角周波数であり, $\omega_j = j \times 2\pi V / \{4(L + \delta)\}$ ($j = 1, 3, 5, \dots$) で与えられる.

一方, Fig.4 のように閉端を $\ell = 0$ としたとき, ℓ における第 j モードの定在波の音圧変動は (9) 式で表わされるが,

Fig. 2 A straight pipe with two open ends

Fig. 3 A straight pipe with one closed end which is on the side of the sensor

Fig. 4 A straight pipe with one closed end which is on the other side of the sensor

このときの振幅 $\beta_j(\ell)$ は次式で与えられる。

$$\beta_j(\ell) = \alpha_j \sin\{j\pi(\ell + \delta)/2(L + \delta)\} \quad (11)$$

結局、音響センサを閉端側に設置すれば、管内定在波の音圧変動は (9) および (10) 式で与えられ、開端側に設置すれば (9) および (11) 式で与えられることになる。したがって、このとき使用モードの集合 Ω を与えれば、(4) および (6) 式と同様な音圧変動の線形ダイナミックシステムが得られる。

3. 最適センサ配置

後述の実験で示すように、同一の管に対し衝撃を与える場合、管内に生じる定在波のスペクトルにはかなり高い再現性があるため、事前に周波数分析により管内定在波の振幅を求めておけば、これ以降はこれらを既知として差し支えない。したがって、本論文においては、管内定在波の各モードの振幅比は与えられているものとして議論を進める。

提案方式では、(4) および (6) 式で与えられる線形ダイナミックシステムに対し管長を未知パラメータとする最尤法を適用することにより管長計測を行なうが、その際、音響センサの位置 ℓ および使用モードの集合 Ω に対し、管長 L の分解能はつぎのダイバージェンスにより定量化される^{5), 6)}。

$$D(\ell, \Omega) = C \sum_{i \in \Omega} \sum_{j \in \Omega} [i \times j \times \beta_i(\ell) \beta_j(\ell) \gamma(\omega_i, \omega_j) / \Xi(\ell, \Omega)] \quad (12)$$

ただし、 C は定数である。なお、 $\Xi(\ell, \Omega)$ は未使用モードの定在波およびセンサ本来の雑音をまとめた観測雑音相当項の分散であるが、定在波成分については空間平均を時間平均で置き換えることにより、 $\Xi(\ell, \Omega)$ は以下のように近似できる。

$$\begin{aligned} \Xi(\ell, \Omega) &= (1/T) \left[\int_0^T \sum_{j \notin \Omega} \beta_j^2(\ell) \sin^2(\omega_j t + \phi_j) dt \right] + R \\ &= (1/2) \sum_{j \notin \Omega} (\beta_j(\ell))^2 + R \end{aligned} \quad (13)$$

ただし、 R はセンサ本来の雑音の分散を表す。さらに、(12) 式に現れる $\gamma(\omega_1, \omega_2)$ は 2 つの角周波数 ω_1 および ω_2 を引数とした次の積分演算により与えられる。

$$\gamma(\omega_1, \omega_2) = \int_0^T t^2 \cos(\omega_1 t + \phi_1) \cos(\omega_2 t + \phi_2) dt \quad (14)$$

(14) 式の積分計算の詳細については文献⁵⁾に譲るが、定在波の基本モードの周期長に比べ、計測に使用するデータウィンドウ長 T がある程度大きければ (5 倍程度以上)、周波数

の異なる正弦波と余弦波および同一周波数の正弦波と余弦波はそれぞれ互いに直交関係を持つので、(14) 式はつぎのように近似できる。

$$\gamma(\omega_1, \omega_2) \simeq T^3/6 \quad (15)$$

上記の近似式を用いれば、(12) 式はつぎのように近似できる。

$$D(\ell, \Omega) = \frac{CT^3}{6} \sum_{j \in \Omega} [\{j \beta_j(\ell)\}^2 / \Xi(\ell, \Omega)] \quad (16)$$

先の報告⁴⁾では、 $\ell = 0$ のもとでの最適モード決定を行なった訳であるが、本論文では計測のさらなる高精度化を図るため、 ℓ の最適化を行なう。具体的には、(16) 式の最大化を行なうことになるが、(16) 式には、 ℓ のみでなく、使用モードの集合 Ω も現れる。よって、(16) 式を ℓ と Ω について同時に最大化することにより、最適センサ配置と合わせて最適使用モードの決定も一緒に行なえることになる。

結局、上記手法により求めた ℓ^* の位置にセンサを設置し、使用モード集合を Ω^* とした線形ダイナミックシステムに対し管長を未知パラメータとした最尤法を適用することにより、さらに高精度な管長計測がなされることになる。ここでは、予備実験により、 ℓ^* と Ω^* を求め、本計測実験でも Ω^* を使用することを述べたが、本実験では最適モードが若干変わる可能性があるため、センサは ℓ^* に固定する必要があるものの、最適モードに対しては、衝撃を与えた実験の度にこれまでの方式⁴⁾に基づき最適モードを求めることが望ましい。

なお、本研究は以下の 2 つのケースに適用できる。ひとつは、ほぼ同じ長さの管長を求める場合であり、ほかは管長が全く未知な場合である。後者の場合は、最初センサを管端において計測実験を行ない、そのとき得られた計測結果を踏まえてセンサを最適位置に置き再び管長計測を行なえばよい。

4. 実験結果および検討

4.1 管内音圧変動の再現性の検討

まず、管に衝撃を与えたときの管内音圧変動のスペクトルの再現性について検討する。

Fig.5 のように、長さ 6,903mm の両端が閉じた塩ビパイプを床から 750mm 上方に水平に設置し、コンデンサ型マイクロホンを管端 ($\ell = 0$ mm) に取り付け実験を行なった。このとき、センサを設置したほうの管端から 200mm の箇所を木の棒で叩いたときの音響センサ出力波形を参考のため Fig.6 に示す。このように管を床から遠く離れたのは、文献⁵⁾で示したように、開口端補正係数としてよく知られた理論的な値である 0.613 を使用することができるからである。なお、センサ出力はサンプリング周期 $\Delta T = 0.2$ ms でパソコンに収録した。また、実験時の管内温度は 30.2°C であった。

まず、40 回の実験を行なった。このとき、再現性を見るため、各実験データに対して FFT を適用し、得られたスペクトル $P(\omega)$ より、第 1 ~ 第 24 モードまでの定在波の各モードの振幅比をそれぞれ求める。まず定在波各モードの振幅を低次モードから順に並べたベクトル $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{24})^T$

(簡潔さのため、ここでは管端における定在波の第 j モードの振幅 $\beta_j(0)$ を単に β_j と表す) を定義する。ただし、ここでは実験者が木製のハンマーで管内音圧変動を生じさせているため、実験ごとに叩く強さが若干異なることを考慮し、上記ベクトルを各ベクトルのノルムで規格化したものを改めて β と定義する。

なお、第24モードまでの定在波モードを考えた理由は平面波とみなされる管内定在波に限定したためである。つまり、管内音波を平面波と見なすためには、定在波の波長が管の内径よりも十分大きい必要があるが、これまでの研究によれば⁵⁾、管の内径の7倍程度以上の波長を持つ定在波まで考えればよいことがわかっており、管の内径が82mmであることを考慮し、波長が575mmの第24モードの定在波までを考えたわけである。

こうして求めた40個の規格化ベクトルに番号をつけ、 $\{\beta_i\}$ と表すが、まずこれらの平均値

$$\beta^* = (1/40) \sum_{i=1}^{40} \beta_i$$

を求め、つぎにこのベクトル β^* と各ベクトル β_i との幾何学的な角度 θ_i を次式により求める。

$$\theta_i = \cos^{-1} \left[\frac{\beta_i^T \beta^*}{\|\beta_i\| \|\beta^*\|} \right] \quad (17)$$

このようにして求めた θ_i ($1 \leq i \leq 40$) の標準偏差を求めると、わずか1.1(degree)となり、各定在波モードの振幅比に対しかなり再現性が高いことが確認できる。

同様に、両端が開の管の場合について実験を行なったが、この場合は θ_i の標準偏差は4.8(degree)となり、両端が閉の場合に比べるとわずかにばらつきが大きくなった。これは、両端が開の管においては、外部の雑音が管内に入りやすいことと、そもそも管端 ($\ell = 0$) における音圧変動が小さいからであると思われる。しかしながら、この場合にも、比

Fig. 5 Outline of the experiment

Fig. 6 Sensor output

較的高い再現性があることがわかる。

4.2 最適センサ配置の決定

4.2.1 両端が閉の場合

上と同一の実験条件のもとで、提案方式により最適センサ配置を決定する。まず、管端 ($\ell = 0$) に音響センサを設置し、センサ設置端から200mmの箇所に1回衝撃を与えたときの観測データに対しFFTを適用した。このときの定在波の各モードの振幅 $\{\beta_j\}$ を用い、センサ位置を変えたときのダイバージェンスの変化を求めてみた。これを示したのがFig.7である。ただし、対称性より、図には管端から管中央までの変化しか描いていない。

図より、厳密には $\ell = 3, 128\text{mm}$ の箇所でダイバージェンスが最大値をとることがわかるが、センサをあまり管内に深く挿入することは実用上得策ではないことおよび完全な再現性はある程度得ないことから、ここではできるだけ管端に近く、かつダイバージェンス値が余り劣化しない極大値を与える箇所(つまり、管端から230mmの位置)を準最適センサ位置として採用することとした。なお、このときの最適モード集合は $\Omega^* = \{5, 13, 18\}$ となった。

4.2.2 両端が開の場合

両端が開の場合について、上と同様にして求めたダイバージェンスの変化をFig.8に示す。図より、ダイバージェンスの最大値を与えるセンサ位置は $\ell = 607\text{mm}$ となるが、上と同様な理由により、ここでは準最適センサ位置として $\ell^* = 185\text{mm}$ を採用した。なお、このときの状態変数として採用する定在波の最適モード集合は $\Omega^* = \{12, 14, 22\}$ となった。

4.2.3 一端が閉の場合

ここでは、まず管の一端を閉、他端を開とした管に対し、センサを閉端側に設置し、閉端から200mmの箇所で管に軽く1回衝撃を与えたときに得られた観測データを用い、閉端を $\ell = 0$ としてダイバージェンスの変化を求めた結果をFig.9に示す。ただし、一端を閉とした場合には、両端が開(あるいは閉)の場合と異なり対称性がないため、管全体 ($[0, 6.903\text{m}]$) に対するダイバージェンスの変化を示している。

図より、ダイバージェンスが最大値をとるセンサ位置は $\ell = 6,692\text{mm}$ となり、閉端からきわめて遠い箇所となるため、ここでは4.2.1と同様な理由から、ダイバージェンス値があまり変わらない準最適配置として $\ell^* = 0\text{mm}$ (つまり閉端部)を採用することとした。なお、このときの最適モード集合は $\Omega^* = \{25, 33, 35\}$ であった。

なお、閉端においてはすべての定在波モードの振幅が最大(つまり、定在波の腹)となるにもかかわらず、上記のように閉端から離れた箇所のほうがダイバージェンスが大きな値となる場合が生じる理由は、本手法では使用モード以外のモードの定在波をまとめたものを観測雑音と見なしているため、単にすべてのモードの振幅が大となる箇所よりも、使用モードの振幅ができるだけ大きく、かつ、未使用モードの振幅が小さくなる位置にセンサを設置したほうがSN比が高くなり、

Fig. 7 The divergence versus the sensor location for the pipe with two closed ends

Fig. 8 The divergence versus the sensor location for the pipe with two open ends

ダイバージェンスが大となる場合がありうるからである。

つぎに、センサ側の端部を開端に、他端を閉端にした一端が閉の場合を考えてみる。このときのダイバージェンスの変化を求めた結果を Fig.10 に示す。図より、ダイバージェンスの最大値を与える最適センサ配置は $l^* = 245\text{mm}$ 、このときの最適モード集合は $\Omega^* = \{27, 33, 35\}$ となった。

ここで、 l の定義は異なるものの、同一の管（一端閉）に対するダイバージェンスの曲線が Fig.9, 10 で異なるのは、本実験では、前述のように、センサを設置したほうの管端から 200mm の箇所を叩くことにより管内音圧変動を生じさせており、結果的に両者においては（同一の管に対し）異なる箇所を叩いているからである。つまり、叩く箇所が異なれば、当然、管内に生じる定在波の各モードの振幅も異なるため、必然的にダイバージェンス曲線も異なる形状となるわけである。しかしながら、最適センサの位置は開端よりそれぞれ 211mm, 245mm となり、共に開端からほぼ同じ位置になっており、衝撃の箇所は最適センサ位置に余り影響を与えないこともわかる。

4.3 準最適センサ配置による管長計測

4.3.1 両端が閉の場合

4.2.1 の結果をもとに、音響センサを $l^* = 230\text{mm}$ の位置に設置し、最適モードモデルを用いた計測システムを適用したときの計測結果を Table 1 に示す。ただし、表の平均値および SD は、20 回の計測実験を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である。なお、このときの最適モードは各実験とも先の $\Omega^* = \{5, 13, 18\}$ と変わらなかったことを付記しておく。

参考のため、これまでのように音響センサを管端 ($l = 0$)

Fig. 9 The divergence versus the sensor location for the pipe with one closed end (the closed end is on the side of the sensor)

Fig. 10 The divergence versus the sensor for the pipe with one closed end (the closed end is on the other side of the sensor)

に設置したときのシステム（もちろん最適モード使用）による計測結果もあわせて表に示すが、両端が閉の場合には準最適センサ配置を行なった場合でも、管端に音響センサを置いた場合でも、計測精度はほとんど変わらないことがわかる。これは、Fig.6 から明らかなように、音響センサを管端に設置した場合と $l^* = 230\text{mm}$ の位置に設置した場合のダイバージェンスの比はわずか 1:1.7 程度であるからである。

4.3.2 両端が開の場合

音響センサを $l^* = 185\text{mm}$ の箇所に設置したときの計測結果を Table 2 に示す。なお、両端が開の場合は、定在波の腹が管の外側に生ずることから、計測値より開口端補正値の 2 倍を減じる必要があるが、先に報告したように⁵⁾、管が床から 300mm 程度以上離れていれば、通常の補正係数 0.613 を用いてよいことがわかっているため、ここでは計測値より $0.613 \times 41\text{mm}$ (管の内径/2) $\times 2 = 50.3\text{mm}$ を減じた値を管長の計測値とした。

Table 2 より、センサ配置の最適化を行なうことにより、計測精度が格段に高まっていることがわかる。これは、Fig.7 から明らかなように、音響センサを管端に設置した場合と最適位置（あるいは準最適位置）に設置した場合のダイバージェンスの比は 1:14.8 となり、最適あるいは準最適位置にセンサを配置することの意義が大きい、つまり管長計測に際しての分解能を大幅に高められるからである。

このことは、逆にいえば、センサの最適配置を行なうことにより、わずか 1 回の実験で、管端にセンサを設置したときの数多くの計測実験に相当する情報が得られることになる。

Table 1 Measurement results for the pipe with closed ends

	mean (mm)	SD (mm)
true	6,903	
optimal sensor location	6,904	1.9
sensor location $\ell = 0$	6,904	2.0

SD : standard deviation

Table 2 Measurement results for the pipe with open ends

	mean (mm)	SD (mm)
true	6,903	
optimal sensor location	6,904	1.3
sensor location $\ell = 0$	6,908	2.8

Table 3 Measurement results for the pipe with one closed end (the closed end is on the side of the sensor)

	mean (mm)	SD (mm)
true	6,903	
optimal sensor location	6,905	1.8

Table 4 Measurement results for the pipe with one closed end (the closed end is on the other side of the sensor)

	mean (mm)	SD (mm)
true	6,903	
optimal sensor location	6,905	1.6
sensor location $\ell = 0$	6,897	3.0

したがって、本最適センサ配置により、管長計測精度の大幅な向上、あるいは同一精度のもとでなら大幅な労力の削減が実現できることになる。

4.3.3 一端が閉の場合

まず、音響センサを閉端部（つまり、 $\ell^* = 0\text{mm}$ ）に設置し、最適モードモデルを用いた計測システムを適用した。もちろん、管内音圧変動は閉端から200mmの箇所を叩くことにより生じさせた。この場合、管端が最適センサ位置となるため、これまでの非最適センサ配置としての管端位置との比較はできないが、ほかのケースとの比較のため、計測結果をTable 3に示す。なお、ここでも開口端補正值 ($0.613 \times 41\text{mm} = 25.2\text{mm}$) を減じた値を計測値とした。表より、両端が閉のときと同程度の高精度な計測が行なえていることがわかる。

つぎに、音響センサのほうを開端とした同一管に対し、センサを開端から $\ell^* = 245\text{mm}$ の箇所に設置したときの計測結果をTable 4に示す。表より、最適センサ配置のほうが、管端（開端）にセンサを設置するより計測精度が格段に高まることがわかる。これは、Fig.10からわかるように、音響センサを管端に設置した場合と最適位置に設置した場合のダイバージェンスの比は1:19.8となり、両端が開のときと同様、管長計測に際しての分解能が大幅に高まるからである。

5. 結 言

著者らがこれまで開発して来た定在波を利用した管長計測法に対し、ダイバージェンスの観点から、音響センサの最適配置法を与えた。また実験により、同一の管に対しては、衝撃を与えたときに管内に生じる定在波の出現パターンには再現性があることを確認するとともに、これにより事前に本提

案方式による最適センサ配置が求められることを述べた。

提案手法の応用例として、たとえば鉄鋼メーカーで生産されるパイプの長さ計測があるが、この場合ほぼ同一サイズのパイプをまとめた数、順次計測することになるので、提案方式が有効に活用できるものと思われる。

なお、個別の管の管長を計測する場合には、まず管端にセンサを設置し、第1回目の管長計測と合わせ最適センサ配置を決定する。その後、センサを最適位置に設置した後、2回目の衝撃を与え、最適モードモデルを用いた提案システムによる計測を実行すれば、少ない労力で管長の高精度計測が達成できることになる。

参 考 文 献

- 1) T.Manabe, S.Tomita and T.Yabuta: Acoustic Inspection System for Underground Telecommunication Conduit, Proc. of IMTC'94, 761/764 (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) 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)
- 4) 岡本・田中：定在波を用いた管長の高精度計測における最適モード選択，計測自動制御学会論文集，35-1, 1/9 (1999)
- 5) 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)
- 6) S.Kullback: Information Theory and Statistics, John Wiley and Sons (1959)
- 7) 岡本・リズキエフ・田中：定在波を用いた分岐管の長さおよび分岐点位置の計測，システム制御情報学会論文誌，15-9, 469/476 (2002)

[著 者 紹 介]

岡 本 昌 幸 (正会員)

1999年，山口大学大学院理工学研究科システム工学専攻博士後期課程修了。同年同大学助手となり現在に至る。音響センサを用いた高精度管長リアルタイム計測に関する研究に従事。電気学会などの会員。

Farrukh RIZKIYEV (学生会員)

2001年山口大学大学院理工学研究科電気工学専攻博士前期課程修了。現在，同研究科システム工学専攻博士後期課程在学中。音響センサを用いた管長オンライン計測に関する研究に従事。

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，生体医用計測などの理論および応用研究に従事。電気学会，システム制御情報学会，日本非破壊検査協会，日本鉄鋼協会などの会員。