

# 入門講座

計測・制御技術入門 計測技術-3

## 知的音響応用計測

Intelligent Acoustics Applied Measurement

田中正吾  
Shogo Tanaka

山口大学 工学部電気電子工学科 教授

### 1 緒言

産業界におけるシステムのインテリジェント化や社会のニーズにより、センサには、これまでの高精度な変換器としての機能に加えて、高付加価値の情報創造が求められるようになってきた<sup>1)</sup>。この背景には、計測の困難な局面がまだまだ多く、計測さえできれば、なんとか制御が行えたり、あるいは制御性能や稼働率のさらなる向上が望める局面が現実の問題には極めて多いことがあげられる。この要請に応えるには、センサデバイスのいっそうの進展のみならず、センサをコンピュータと有機的に結合・融合することにより、高付加価値的な機能を実現するシステムの構築が望まれる。このようなシステムの実現にあたっては、ひとつは、センサの動作原理にまでふみ込み、センサ、計測対象、計測環境すべてを一体化したシステムとして見、センサに得られるデータの発生メカニズムを逆にたどり、所望の計測量を求めることが考えられる<sup>2,3,4)</sup>。

本稿では、これまでの計測が、ややもするとセンサ情報の利用に際し、センサ出力のエンベロープ（包絡線）を利用したり、センサ出力にFFTやウェーブレットなどの汎用の信号処理法を適用するなど、計測対象の物理的な側面を考慮していなかったことに鑑み、センサ、計測対象にダイナミックスの概念を導入することにより（つまり物理的な洞察を加えることにより）、従来とは異なる高付加価値的な計測システムが構築できることを、筆者がこれまで行って来た定在波を用いた直管、湾曲管、分岐管（開管、閉管）の管長計測及び超音波を用いた溶鉱炉を始めとするコンクリート構造物の非破壊検査を例に、音響応用計測の立場から解説してみたい。

### 2 定在波を用いた管長計測

#### 2.1 基本的な考え方

直管、湾曲管、分岐管などの管長を間接的に計測する方式としては、パルスエコー法がよく知られているが<sup>5,6,7)</sup>、この方式は音の入射装置が必要であるだけでなく、（伝播音が一般に紡錘形振動波形であるため）反射波の到達時刻を正確に求めることが困難であり、計測精度が低い。更に、外乱音環境下では使用できない。

このような場合は、文献8)に示したように、管内に衝撃等により発生させた、あるいは管内に自然発生した定在波を用いる管長計測方式が便利である。この方式は、パルスエコー法に比べ、精度が良く、かつ低コストで済む。原理は、両端が閉じた直管の場合で言えば、管に軽く衝撃を与えると管内には瞬時に $f=jV/(2L)$  ( $j=1, 2, \dots$ ) なる周波数の定在波が生じ（ $V$ は管内の音速、 $L$ は管長）、音圧変動データの周波数解析により管長 $L$ が直ちに求められることである。従って、使用するものは音響センサ1個でよい。

しかしながら、このとき注意しなければならないことは、FFT（高速フーリエ変換）などの汎用の周波数分析手法を用いると、それなりの精度の計測は可能であるが、真に高精度な計測は期待できないことである。これは、周波数分析したときに得られるピーク周波数に対し、上記の関係式により最小二乗法により管長計測を行う際、ピーク周波数の（真の値からの）偏位が互いに独立なガウス分布に従う保証が全くないからである。

これを解決するひとつの方法は、計測の原点に立ち戻り、音圧変動が基本モード周波数の整数倍の周波数の定在波より成り立つ事実を積極的に使うことである。これに対するシステム論的なひとつのアプローチは、定在波の幾つかを管長を反映する状態変数に採用し、音圧変動をダイナミックモデルで表すことである。例えば、管内に形成される定在波は高周

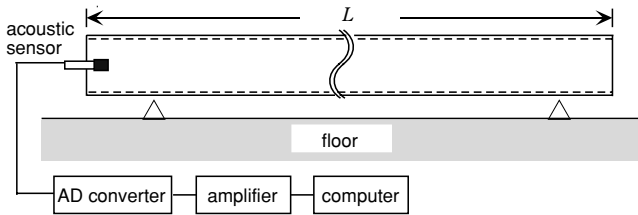


Fig. 1 Pipe length measurement for a straight pipe

波ほど一般に減衰が速いことを考え、管内任意の点における音圧変動  $x(t)$  を、次のように、基本モードから第3モードまでの3つの定在波の一次結合によりモデル化することである<sup>8)</sup>。

$$\begin{aligned} x(t) &= \sum_{j=1}^3 x_j(t) \\ &= \sum_{j=1}^3 \{a_j \sin(\omega_j t) + b_j \cos(\omega_j t)\} \quad \dots\dots\dots (1) \end{aligned}$$

ただし、 $x_j(t)$  は第  $j$  モードの定在波の音圧変動であり、これの角周波数  $\omega_j$  は、両端が閉の直管の場合、 $\omega_j = j \times 2\pi V / (2L)$  により与えられる。モデル化に用いた各モードの音圧変動  $x_j(t)$  は微分方程式

$$\ddot{x}_j(t) = -\omega_j^2 x_j(t) \quad (j=1, 2, 3) \quad \dots\dots\dots (2)$$

を満足するので、いま状態ベクトル  $\mathbf{x}(t) = (x_1, \dot{x}_1, x_2, \dot{x}_2, x_3, \dot{x}_3)^T$  を導入すれば、3 倍モードまでの音圧変動に関する状態方程式は次式で与えられる。

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

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} A_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 \end{bmatrix} \\ A_i &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_i^2 & 0 \end{bmatrix} \quad (1 \leq i \leq 3) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

である。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、計測時に使用する一連のデータ（データウィンドウ）内での時間に伴う音圧変動のわずかな減衰を補償するため導入している。なお、 $w_i(t)$  ( $i=1, 2, 3$ ) は、簡単のため、それぞれ平均値ゼロ、分散  $\sigma^2$  の互いに独立な白色ガウス雑音とした。(3) 式をサンプル値化すれば<sup>8)</sup>

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{F}\mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k \quad \dots\dots\dots (5)$$

一方、(1) 式のモデル化で表しきれない4倍モード以上の定在波成分及びセンサ本来の雑音をまとめたものを観測雑音と見なせば、音響センサにより与えられる観測方程式は

$$y_k = \mathbf{H}\mathbf{x}_k + v_k \quad (k=0, 1, \dots) \quad \dots\dots\dots (6)$$

と記述できる。ここで、 $\mathbf{H} = [1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0]$  であり、 $y_k, v_k$  はそれぞれサンプリング時刻  $k\Delta T$  における観測値及び観測雑音である。

また、多数の定在波モードの音圧変動を一次結合したものは白色ガウス雑音に近い統計的性質をもつことから<sup>8)</sup>、上記システムは線形・白色ガウス性システムとなるので、 $L$  の値を与えれば、定在波の第3モードまでの音圧変動に関わる状態ベクトル  $\mathbf{x}_k$  の推定は、次の良く知られたカルマンフィルタによりなされる<sup>3)</sup>。

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} = \mathbf{F}\hat{\mathbf{x}}_{k-1/k-1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\hat{\mathbf{x}}_{k/k} = \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} + \mathbf{K}_k \gamma_k \quad \dots\dots\dots (8)$$

$$\gamma_k = y_k - \mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_{k/k-1} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\mathbf{P}_{k/k-1} = \mathbf{F}\mathbf{P}_{k-1/k-1}\mathbf{F}^T + \mathbf{W} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$\mathbf{P}_{k/k} = \mathbf{P}_{k/k-1} - \mathbf{K}_k \mathbf{H} \mathbf{P}_{k/k-1} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$k=0, 1, \dots$$

ただし

$$\mathbf{K}_k = \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}^T \Lambda_k^{-1} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\Lambda_k = \mathbf{H} \mathbf{P}_{k/k-1} \mathbf{H}^T + \Xi \quad \dots\dots\dots (13)$$

なお、 $\hat{\mathbf{x}}_{k-1/k-1}, \hat{\mathbf{x}}_{k/k-1}$  はそれぞれ  $(k-1)$  時刻までの観測情報に基づく  $(k-1)$  時刻の状態推定値及び  $k$  時刻の状態予測値を、また  $\mathbf{P}_{k-1/k-1}, \mathbf{P}_{k/k-1}$  はそれぞれそれらに対する誤差共分散行列を表している。更に、 $\mathbf{W}$  はサンプル値系に対する遷移雑音の共分散行列を、 $\Xi$  は観測雑音  $v_k$  の分散を表している。しかしながら、管長  $L$  および観測雑音分散  $\Xi$  は未知であるため、上記のカルマンフィルタを直接的には使用できず、使用に当たっては、これら2つのパラメータを  $\boldsymbol{\theta} = (L, \Xi)^T$  とし、 $\boldsymbol{\theta}$  に候補を与えなければならない。

この  $\boldsymbol{\theta}$  の推定に際しては、実現した音圧変動に最近接する音圧変動を（予測値として）生成できるパラメータが真のパラメータとみなせることから、管長  $L$  の計測は、結局、次の尤度関数の最大化に帰着される<sup>3, 8)</sup>。

$$J(\boldsymbol{\theta}) = \prod_{k=1}^K p(y_k/\boldsymbol{\theta}, Y^{k-1}) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ここで、 $p(y_k/\boldsymbol{\theta}, Y^{k-1})$  は観測情報  $Y^{k-1} = \{y_j; 0 \leq j \leq k-1\}$  及び  $\boldsymbol{\theta}$  の下での観測値  $y_k$  の条件付確率密度関数であり

$$p(y_k/\theta, Y^{k-1}) = \frac{1}{[2\pi\Lambda_k(\theta)]^{1/2}} \exp \left[ -\frac{1}{[2\pi\Lambda_k(\theta)]} \times \{y_k - H\hat{x}_{k/k-1}(\theta)\}^2 \right] \dots\dots\dots (15)$$

ただし、 $\hat{x}_{k/k-1}(\theta)$  及び  $\Lambda_k(\theta)$  はそれぞれパラメータ  $\theta$  の下での（カルマンフィルタによる）状態推定値  $\hat{x}_{k/k-1}$  および観測予測誤差分散  $\Lambda_k$  を表す。

(15) 式の最大化に当たっては、 $\Xi$  が分散という統計量であるため、 $(L, \Xi)$  空間ではなく、 $\Xi$  に自然対数をとった  $(L, \ln \Xi)$  空間で探索した方が効率的である<sup>3)</sup>。この方法により、10数mの直管であれば、0.2 s位の音圧変動データで、0.2～0.3%の高精度な管長計測が瞬時に行える。

## 2.2 最適モード選択による計測の高精度化

計測精度を更に高めるには、使用モードとして常に第3モードまでの低次モードを使用するのではなく、状況に応じ管長  $L$  の識別分解能を最大にする最適モードを選択、使用することが考えられる。この最適モードの決定規範としては、ここではフィッシャーの情報規範<sup>9)</sup> を用いたものを紹介する。

いま、上記ダイナミックモデルに使用する定在波モードとして、モード番号が  $\{N_j; 1 \leq j \leq q\}$  の  $q$  個のモードを考えたとすれば、観測値は次式で表される。

$$y_k = \sum_{j=1}^q \alpha_{N_j} \sin(\omega_{N_j} k \Delta T + \phi_{N_j}) + v_k \dots\dots\dots (16)$$

ここで、 $\alpha_{N_j}$ ,  $\omega_{N_j}$  ( $1 \leq j \leq q$ ) はそれぞれ定在波の第  $N_j$  モードの振幅および角周波数を、また  $\phi_{N_j}$  は初期位相を表す。なお、 $v_k$  は観測雑音相当項であり、低次モードのときと同様、モデル化に使用しない定在波モードの音圧変動の和とセンサ本来の雑音を加えたものである。このとき、観測値の時系列信号をまとめた観測値ベクトル  $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_M)^T$  を導入し、これの従う確率密度関数を  $p(\mathbf{y})$  とすれば、未知パラメータを  $L$  のみとして（感度解析によると、 $\Xi$  の寄与は小さいため未知パラメータからはずす）、フィッシャーの情報行列（この場合はスカラー）は次式で定義される<sup>9)</sup>。

$$K(L) = \int \left[ \frac{\partial}{\partial L} \ln p(\mathbf{y}) \right] \left[ \frac{\partial}{\partial L} \ln p(\mathbf{y}) \right]^T p(\mathbf{y}) d\mathbf{y} \dots\dots (17)$$

上式の詳細な計算は文献10)に譲るが、適切な近似により次のように表される。

$$K(L) \simeq \frac{(\pi v)^2 (M \Delta T)^3}{L^4} \sum_{j=1}^q \{(\alpha_{N_j} N_j)^2 / \Xi\} \dots\dots\dots (18)$$

ただし、 $\Xi$  は観測雑音分散であり、未使用モードの集合を  $\Omega$  で表せば、エルゴード性を仮定して次のように表される。

$$\Xi = \frac{1}{2} \sum_{j \in \Omega} (\alpha_j)^2 + R \dots\dots\dots (19)$$

ここに、 $R$  はセンサ本来の雑音の分散である。

結局、与えられた使用モード数の制約の下で (17) 式を最大化するモード集合を選べばよい。こうして得られる最適モードは、(18) 式からも容易に理解できることであるが、振幅が大きく、かつモード番号ができるだけ異なって大きいモードが最適となる。振幅の大きいものはSN比の観点から妥当であることは直観的に理解できるが、モード次数の高いものが望ましいのは、管長に対する周波数の感度が高いからである。なお、最適モードの決定に際しては、 $L$ ,  $\{\alpha_j\}$ ,  $\Xi$  の値が必要であるが、これらには、先の低次モードモデルにより求めた計測値  $\hat{L}$  およびこれに基づき直交成分分析により求めたものを充てがえばよい。

この最適モードを用いた計測システムの適用により、前節と同じ0.2 s程度の音圧変動データで、計測精度が0.01～0.05%の高精度計測が可能となる<sup>10)</sup>。従って、このような高精度計測を実現するには、低次モードを用いた計測システムと最適モードを用いた計測システムを順次1回ずつ用いる必要がある。もちろん、後者の計測システムによる幾つかの計測値を平均するようにすれば、更にばらつきの少ない高精度計測が実現できることは明らかである。

## 2.3 関連研究および適用例

前節では音響センサを1個用いた直管に対する管長計測システムを紹介したが、管内の異なる位置に2個の音響センサを設置することにより、定在波の空間的な振幅の違いを利用して、管長のみならず管内温度も同時に高精度計測できるシステムも構築できる<sup>11)</sup>。この方式は、通常のサーミスタ型温度計では追従できないくらい急激に管内温度が変化する場合の管長計測に有効である。例えば、軟弱地盤改良工事における砂柱形成時のケーシングパイプ内気柱の温度は、パイプ内気柱がコンプレッサーにより急激に加圧、減圧されるため、管内温度が急激に変化する。このような場合のパイプ内砂面位置計測に、上記音響センサ2個の管長計測システムは適用できる。また、前節で紹介した計測方式は、センサと対象を替えても依然有効である。例えば、最近緊急課題となっているコンクリート崩落事故予防のための「超音波センサによるクラックの有無検出及びクラック位置計測」に対しても、そのまま応用が効く<sup>12)</sup>。これは、コンクリート内部に超音波を発射すると、これがトリガとなり、Fig.2に示すように、コンクリート表面とクラックの間に定在波が発生し、これが超音波センサに受信されるからである。更に本方式は、ビルディング建設に伴う地下水位のリアルタイムモニタリングだけでなく、地震予知にも応用できる。これは、土中にパイプ状の井戸を掘ることにより、前者は井戸内の地下水面を管の一端（閉端）とする定在波が管内に発生できることが、また

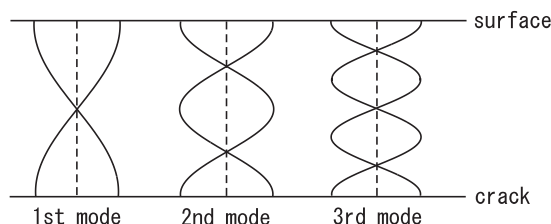


Fig.2 Stationary waves generated between concrete surface and an internal crack

後者は地震発生直前に地盤が隆起し地下水位が変動することが利用できるからである。

この他にも、管の一端を蓋で開閉し、その前後の管内音圧変動を音響センサで2回観測することにより、管軸方向の温度分布や管端の条件に左右されず管長が正確に計測できる方式<sup>13)</sup>や分岐管における管長及び分岐部の位置計測<sup>14,15)</sup>なども、本方式の延長上で容易に実現できる。

## 3 超音波を用いた境界面の位置計測

### 3.1 基本的な考え方

ここでは、具体的な境界面として、とりあえず説明の都合上コンクリートクラックを考えるが、後述するように溶鉱炉の内壁の厚さ計測など、多くの対象に応用できる。

コンクリートクラックの検出を考える場合、骨材がない場合あるいは骨材のサイズに比べ波長が十分長い超音波センサを用いる場合、クラックの位置計測は、クラックまでの音波往復伝播時間を計測することが基本となる。しかしながら、超音波センサには、センサ設置面とクラックの間の反射波が重畳して観測されるだけでなく、初期時間帯では外乱（表面に生ずる横波）が加わり、クラックからの反射波が孤立波として得られず、結局、クラックまでの往復音波伝播時間を正確に求めることが困難となる。このため、コンクリートの非破壊検査に対しては、これまで長い間、超音波センサを用いた検査手法が研究されて来たが、未だ信頼度の高い手法は開発されていない<sup>16,17)</sup>。

そのため、筆者らは、これを解決するひとつの方法として、前章で紹介した定在波モデルに基づく超音波計測方式を開発したが、これ以外に、ここでは受波信号波形と（理論的に予測できる）予測受波信号波形のパターンマッチングにより往復音波伝播時間を計測する方式を紹介する。つまり、「多重反射波モデルによる計測法」を紹介する<sup>18)</sup>。

この方法では、機構的に送波器が電気信号を音圧信号に、また受波器が音圧信号を電気信号に変換する音響振動子を有する変換器であることを考慮し、 $U(s)$ を送波器に入力する電気信号 $u(t)$ のラプラス変換として、受波器に出力される

電気信号を

$$r(t) = \mathcal{L}^{-1} [G_0(s) G_1(s) G_2(s) U(s)] \quad \dots\dots\dots (20)$$

でモデル化する<sup>3,18,19)</sup>。これを、ここでは基本反射波形と呼ぶ。なお、

$$G_0(s) = e^{-sT_0} \quad \dots\dots\dots (21)$$

$$G_i(s) = \frac{K_i}{s^2 + 2\zeta_i \omega_i s + (\omega_i)^2} \quad \dots\dots\dots (22)$$

( $i=1, 2$ )

である。ここに、 $\omega_i$ ,  $\zeta_i$ ,  $T_0$ はそれぞれ送受波器の固有角周波数、減衰係数及び音波伝播時間を表す。

このモデルに現れる減衰係数や固有角周波数は、使用するセンサにより定まる未知パラメータであるが、これらは実際の受波信号と(20)式により求められる予測信号 $r(t)$ とのパターンマッチングにより予め求めておけば、それ以降はセンサ毎に既知の定数として扱える。

参考のため、Fig.3に、小石や鉄筋より成る骨材を有する通常のコンクリート供試体に対し、40kHzの中心周波数をもつ超音波センサを用いたときの受波信号波形及びこれに基づき求めたパラメータ調整後の基本反射波形（予測波形）を示すが、モデル波形により実際の受波信号がかなり正確に表現できている様子がわかる。なお、頭部と尾部の一部のみ、実波形を表しきれていない部分が観察されるが、これは実波形の方は一連の反射波が絶え間なく重畳して観測されていることによる。もちろん、本実験における入力としてはインパルス状のものを考えている。

通常のクラックの検出を考える場合、超音波センサ直下のクラックの数は1つと仮定して差し支えない。このとき受波器に得られる反射波は、最初の時間帯では、センサ設置面での表面波が観測されるが、ある程度時間が経過すると、クラックとセンサ設置面との間の縦波が観測される。しかしながら、この縦波は表面とクラックの間を何回も（減衰しつつ）往復するので、超音波センサにはこれらを重ね合わせたものが観測される。この重ね合わされる単位が上述した基本反射波形、つまりFig.3に示すような紡錘形振動波形である。

よって、クラックからの孤立波（単一反射波）を見出し、これにより表面とクラックとの間の音波往復伝播時間を求める従来法では、どの時間帯のデータを用いても、往復音波伝播時間の計測は困難であることがわかる。

ここでは、このような物理現象を真面目に捉えた方法を紹介する。まず、反射波の受波状況であるが、上述したように、センサ設置面での表面波などが無いと仮定すれば、クラックが1個なので、クラックとセンサ間の往復音波伝播時間を $T$ とすれば、 $T, 2T, 3T, \dots$ なる周期的な時刻に反射波が受波さ

れる。また、最初に得られる反射波の振幅は入射時のものにクラックでの反射率  $\gamma_1 (< 0)$  および途中の減衰率  $\alpha (> 0)$  を掛けたものとなるので、入射信号の振幅に  $\alpha\gamma_1$  を乗じた大きさのものが観測される。2 番目以降の反射波については、さらにセンサ設置面で反射し、センサ設置面とクラックとの間で同様な多重反射を繰り返すので、センサ設置面での反射率を  $\gamma_2 (< 0)$  とすれば、直前に得られた反射波の大きさに対し、更に  $p (= \alpha\gamma_1\gamma_2)$  倍ずつ減衰する (なお、 $p$  は  $0 < p < 1$  の値をとる)。なお、クラックには空気や水が含まれているので、反射率  $\gamma$  は常に負となる (反射率が負とは、反射波の位相が入射波の位相と逆相になることを意味する)。

従って、送波後、表面波 (横波) の影響がなくなった頃の適切な幅のデータウィンドウを考え、この中にクラックからの反射波 (多重反射波) が  $m$  個含まれているとすれば、受波信号  $r_x(t)$  は (20) 式の基本反射波形  $r(t)$  を用いて、スカラー倍の自由度を残して、次のようにモデル化される。

$$r_x(t) = \sum_{i=k}^{k+m} p^i r_0(t-iT) \quad \dots\dots\dots (23)$$

なお、 $r_0(t)$  は (20) 式において  $T_0$  をゼロとした基本反射波形を表す。また、 $k$  はこのデータウィンドウに最初に含まれる反射波が第  $k$  反射波であることを意味する (もちろん部分的に含まれる場合も含む)。

よって、この予測受波信号波形と実際の受波信号波形  $\tilde{r}(t)$  との最適パターンマッチングを実現する  $p, k, T$  を求めれば、このときの  $T$  が求めるクラックまでの往復音波伝播時間となる。この最適パターンマッチングを実行するための評価関数としては、次式が採用できる。

$$\theta = \cos^{-1} \left[ \frac{(\tilde{r}, r_x)}{\|\tilde{r}\| \cdot \|r_x\|} \right] \quad \dots\dots\dots (24)$$

ここで、 $(\cdot, \cdot)$  及び  $\|\cdot\|$  はヒルベルト空間内での内積及びノルムを表す。なお、計測に際しては所定のサンプリング周波数でデータを収録するため、 $\theta$  の計算に当たっては、 $\tilde{r}(t)$ ,  $r_x(t)$  をそれぞれ数ベクトルに置き換え、通常のユークリッド空間内での内積及びノルムの計算に置き換える。従って、ク

ラックまでの往復音波伝播時間  $T$  は、この  $\theta$  を最小化する  $p, k, T$  を求めることにより得られる。なお、最適化に際しては (つまり  $p, k, T$  の探索に当たっては)、効率的な探索が可能な Powell 法<sup>3,20)</sup> が便利である。こうして求めた  $\theta$  の最小値が所定のしきい値より小さくなれば、クラックがあったと判断され、このときの伝播時間  $T$  の  $(1/2)$  倍にコンクリート構造物中の音速  $V$  を乗じれば、クラックの深さが  $L = (T/2) V$  で求まる。

なお、(24) 式の最小化に当たっては、 $p, k, T$  が最適化変数となるが、 $p, T$  は連続的な値をとるものの、 $k$  は  $1, 2, \dots$  などの離散的な値 (整数) をとる。従って、実際の最適化に際しては、まず  $k$  に適切な値を与え、次に固定した  $k$  に対し  $p, T$  の最適化を行うことが望ましい。なお、この最適化に対しては、変数が  $p, T$  の 2 つになるが、更に簡略化することもできる。つまり、 $r_0(t-iT)$  ( $i=k, k+1, \dots, k+m$ ) の一次結合係数に (23) 式のような条件を付けずに、単なる  $r_0(t-iT)$  ( $i=k, k+1, \dots, k+m$ ) の一次結合とし、これらで張られる空間に  $\tilde{r}(t)$  を直交射影し、 $r_x(t)$  と  $\tilde{r}(t)$  のパターンマッチング角を求めることである (Fig.4 参照)。この方式の詳細は文献18) を参照されたいが、このときの最小化すべき評価関数は

$$\theta = \sin^{-1} [\delta / \|\tilde{r}\|] \quad \dots\dots\dots (25)$$

となる。ここに  $\delta$  は最適近似誤差ノルムであり、上記の関数のグラム行列式の比で簡単に求められる。この場合は  $T$  の最適化だけで済む。この簡易法では、 $k$  を離散的な値に何回か変えつつ、 $\theta$  を  $T$  について最小化し、このとき得られた最小値を更に最小化する  $k$  及びそのときの  $T$  を選べば、求めるクラックまでの往復音波伝播時間が求まる。この簡易法は  $p$  の値を積極的に用いないが、実験によると、先に挙げた厳密な方法とほとんど同一精度の計測結果が得られる。

この多重反射波モデルは、若干の修正を行うことにより、複数の境界面をもつ対象にも適用できる。例えば、溶鉱炉の炉壁異常診断、つまり溶鉱炉内部の耐火レンガや鉄の厚み

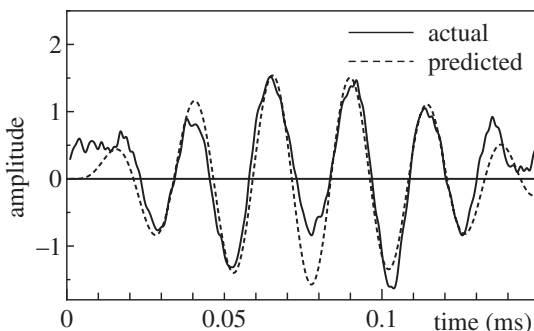


Fig.3 Fundamental reflected wave

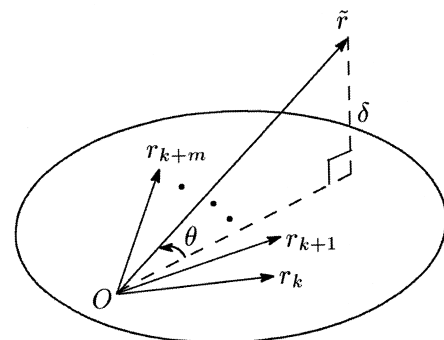


Fig.4 Orthogonal projection

計測にも適用できる。詳細については文献19)を参照されたいが、炉壁の各境界面からの反射波がいつ、どのような大きさ、どのような符号でセンサに戻ってくるかを、受波時刻マップの形でとらえ、理論的な予測受波時刻マップと(実際の受波信号を基本反射波の一次結合として表現したときの)実受波時刻マップとを照合することにより、上記計測を達成するものである。上述したコンクリートクラックの位置計測は、境界面がひとつの特別な場合である。

### 3.2 実験及び検討

ここでは、紙面の都合上、多重反射波モデルによるコンクリートクラック計測結果を示す。まず、Fig.5に示すように、縦、横、厚みがそれぞれ600 mm、250 mm、48 mmの直方体形状の骨材の入っていないコンクリート供試体の表面中央に中心周波数400 kHzの超音波センサを設置したときの受波信号波形をFig.6に示す。図より、送波直後はセンサ設置面での表面波が大きく観測されるが、送波後しばらくして底面からの多重反射波がはっきり確認できる( $D_1$ の部分)。

いま、 $D_1$ の部分のデータに多重反射波モデルを適用したときのマッチング角の推移をFig.7に示す(ここで、横軸は往復音波伝播時間 $T$ を表す)。図では多くの小さなリップルが生じているが、これは基本反射波形が紡錘形振動波形であるため、超音波センサの振動周波数の半周期毎にマッチングが局部的に改善されるからである。結局、伝播時間 $T$ を大きい方から小さくしていったときに始めて現れる深い極小値を与える時間 $T=25.8 \mu\text{s}$ が求めるクラック(ここでは底面)までの往復音波伝播時間を与える。なぜなら、 $T$ を小さくすれば、必要以上に多くの基本反射波の一次結合で受波信号波形をマッチングすることになり、マッチング角が必然的に小さくなるからである。いま、音速をコンクリート中の標準的な音速3,500 m/sとして、底面までの距離を計算すると、 $(1/2) \times 25.8 \mu\text{s} \times 3,500 \text{ m/s} = 45.2 \text{ mm}$ となり、実測距離48 mmに非常に近いものが得られる。

Fig.6では、多重反射波がたまたま目視で読み取れるが(A、B、Cはそれぞれ第2、第3、第4反射波に相当)、第3、第4反射波の立ち上がり時刻はかなり不明確である。このように不明確であっても、多重反射波がある程度読み取れる場合は、従来法でもある程度対応できるが、通常は多重反射波として認識できないくらい複雑に重ね合わさっている。このような場合にも、提案方式は異常の検出・診断に有効である。

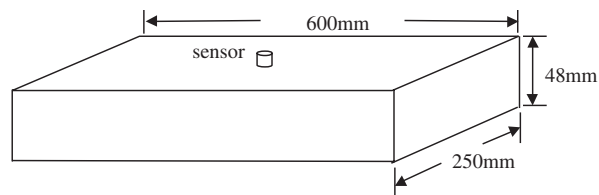


Fig.5 Test specimen (without aggregate) and sensor location

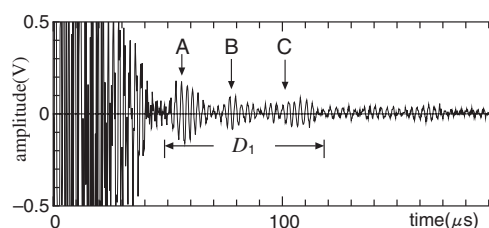


Fig.6 Received signal wave for the test specimen

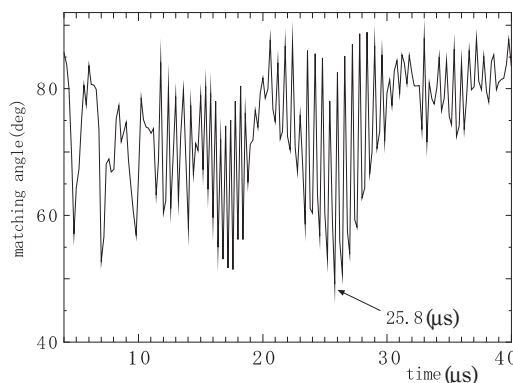


Fig.7 Transition of the optimal matching angle for the test specimen

## 4 結言

本稿では、センサ、計測対象、計測環境など計測過程で現れるダイナミクスを積極的に、かつ総合的にシステムに取り込むことにより、これまでとは一味異なる有益な知的計測システムが構築できることを、定在波を用いた管長計測や、超音波センサを用いた溶鉱炉などコンクリート構造物の非破壊検査を例に、音響応用計測の立場から示した。また、単なる信号処理方法(例えばFFTやウェーブレット)ではなく、物理モデルを念頭におくことの重要性を示唆した。

特に、後者の超音波センサを用いたコンクリート構造物の非破壊検査方式は、超音波を電磁波に変えることにより、他の積層体の各成分物質の厚さや位置などの非接触計測にも適用できる。

最後に、本解説が、新たな計測システムの開発に向けて、少しでも読者諸兄のお役に立てば望外の幸せである。

## 参考文献

- 1) 山崎弘郎：センサのはなし，日刊工業，(1987)
- 2) 池田，小野，青木：走行車両の動的質量計測，計測自動制御学会論文集，28 (1992) 1, 50.
- 3) 田中正吾：計測システム工学，朝倉書店，(1994)
- 4) 田中正吾：センサダイナミクスを考慮した知的音響応用計測システム，計測と制御，36 (1997) 7, 476.
- 5) 佐藤，田井，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，(1993)，11.
- 6) M.Manabe, S.Tomita and T.Yabuta: Acoustic Inspection System for Underground Telecommunication Conduit, Proc. of IMTC '94, (1994), 761.
- 7) 田中正吾，本村亮二，山下広志：音響センサを用いた配管の形状および長さ計測，電気学会論文誌，116-C (1996) 10, 1175.
- 8) 田中正吾・岡本昌幸：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 (1998) 2, 78.
- 9) S.Kullback: Information Theory and Statistics, John Wiley and Sons, (1959)
- 10) 岡本昌幸，田中正吾：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 (1999) 1, 1.
- 11) 田中正吾：2個の音響センサを用いた管長および管内温度同時オンライン計測について，計測自動制御学会論文集，37 (2001) 8, 720.
- 12) 田中正吾，岡田卓也：定在波モデルを用いた超音波センサによるコンクリート構造物の非破壊検査，非破壊検査，50 (2001) 7, 446.
- 13) 田中正吾・岡本昌幸：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 (2002) 10, 1.
- 14) 岡本昌幸，F.リズキエフ，田中正吾，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 (2002) 9, 469.
- 15) S.Tanaka, M.Okamoto and M.Nakayama: Pipe Length Measurement for Pipes with Open Ends Using Stationary Wave Under Noisy Environment, Proc. of The 34th ISCIE International Symposium on Stochastic Systems Theory And Its Applications, Fukuoka, Oct.31/Nov.1, (2002)
- 16) 大島洋志，吉岡 修：コンクリート構造物の非破壊検査の適用例ー鉄道トンネルにおける覆工コンクリートの厚さと背面空洞調査，コンクリート工学，127 (1989) 3.
- 17) JTA保守管理委員会編：トンネルの新しい検査手法，トンネルと地下 (シリーズ)，27 (1996) 1-11.
- 18) 田中正吾，山口美由貴，在間秀樹，青柳史郎：信号伝播モデルを用いた超音波センサによるコンクリート構造物の非破壊検査，非破壊検査，49 (2000) 7, 444.
- 19) 田中正吾，吉原孝次：超音波センサを用いた受波時刻マップに基づく溶鉱炉の炉壁異常診断，計測自動制御学会論文集，35 (1999) 8, 1026.
- 20) J.コワリック，M.R.オスボーン (山本・小山共訳)：非線形最適化問題，培風館，(1978)

(2002年12月25日受付)