

# 超音波による貯槽内粉面形状の計測 (第3報)

森元 映治\*・糸井 茂\*・早野 延男\*

## Measurement of Granular Surface Pattern in a Hopper by Ultrasonic Sensor (The 3rd Report)

Eiji MORIMOTO, Shigeru ITOI and Nobuo HAYANO

### Abstract

Measuring equipment with ultrasonic sensor has been developed for the granular surface pattern recognition in a hopper. The estimation algorithm was proposed which utilized the intensity of the received sound and the period in which the wave moved back and forth. The inclination angle and spatial position of the measured point on the surface were determined from the values taking into account the directivities of the sensors, surface condition of the reflection, and attenuation of the sound through the path. The pattern was depicted by microcomputer considering the mutual relations between the locations of the measuring points and the constraint due to the physical properties of the materials treated. The method was applied to the instrument whose resonance frequency and half width were 66 kHz and 5 degrees, respectively. The fundamental characteristics of the measuring unit such as frequency dependence, directivities, attenuation, and measurement error have been studied experimentally. Sufficient results were obtained in a model hopper system with sand whose mean diameter was approximately 300 microns for three surface patterns of plane, concave, and convex.

### 1. 緒 言

貯槽内の粉面制御用検出端として超音波を用いた装置の試作をおこない、反射波強度と送受信時間に基づく形状推定アルゴリズムの適用性について検討した。

粉粒体層の上部界面の形状は容器形状、粉粒体の物性、流入・流出等の諸条件により変化し、流体系の場合と異なり通常一様でないためパターンとしてとらえる必要がある。各種の測定原理中、超音波計測は環境条件の変化に対しても安定した性能を持ち、非接触で長寿命かつ安全性の面からも優れていること等から<sup>1),2)</sup>、発塵・付着対策が問題となる粉粒体プロセスに対して

も有利な方式である。貯槽内の粉面を測定対象とする超音波装置としてはレベル計<sup>3)</sup>が知られるが、これは粉面上の一点までの距離(位置)の測定あるいは容器定位置における材料の存在を検知するものであるため面を3次元的に測定する用途には適していない。

前報までに試作した1号機では粉面の傾斜と乱反射のため測定不能となる点を多く生じた<sup>4)</sup>。このため第2号機では揺動機構を付加し、狭指向性のセンサーを用いることで改善をはかり精度の面からも良好な結果を得た<sup>5)</sup>。しかし機械的可動部をもつため計測時間の短縮化に制約を生じ、また装置の小型化をはかる点からも問題点を残した。このため今回はセンサー部を固定した状態で使用し粉面反射波の強度と往復時間から面傾斜角度と位置を推定する方法を示し、新たに試作した装置を用いてそのアルゴリズムの適用性について実験

\*生産機械工学科

的に検討した。

2. 測定原理

Fig. 1において送信器Tより鉛直下方と角度  $\phi_1$  をなす方向に進む波  $A_0$  を考える。粉面上の点Pにおいて反射し、入射角と等しい反射角方向へ進む経路を  $A_1$ 、受信器  $R_0$  にいたる波の経路を  $A_2$  とする。送信波の強度を  $I_T$  とするとき、受信波の強度  $I_R$  は、受信機の指向特性  $D_t$ 、 $D_r$ 、粉面での反射特性  $R$ 、および空中での減衰の影響を受け次式のように表わされるものとする。

$$I_R = R(\phi_2) D_T(\phi_1) D_R(\phi_2) \exp(-\alpha L) I_T \quad (1)$$

ここに、 $L$  は経路長さ、 $\alpha$  は空気中における減衰率である。幾何学的考察から  $\phi_2$ 、 $\phi_3$ 、および粉面の傾斜角  $\theta$  について次の関係が成立する。

$$\phi_2 = \sin^{-1} \left( \frac{2d_0}{K_1} + \sin \phi_1 \right) \quad (2)$$

$$\phi_3 = \cos^{-1} \left( \frac{\frac{1}{4} K_1^2 (\ell^2 K_2^2 + 1) + d_0 K_1 \sin \phi_1 - 4 \ell^2 K_2^2 + 2 d_0 K_2}{\ell K_1 K_2 \sqrt{d_0^2 + \frac{1}{4} K_1^2} + d_0 K_1 \sin \phi_1} \right) \quad (3)$$

$$\theta = \tan^{-1} K_3 \quad (4)$$

ここに、

$$K_1 = \frac{L^2 - d_0^2}{d_0 \sin \phi_1 + L}$$

$$K_2 = \frac{(K_3^2 + 1) \cos \phi_1 \{ (K_3^2 - 1) \cos^2 \phi_1 + 2 K_3 \sin \phi_1 \}}{4 K_3^2 - (K_3^2 + 1)^2 \cos^2 \phi_1}$$

$$K_3 = \frac{2 \ell - K_1 \cos \phi_1}{K_1 \sin \phi_1}$$

また、図中に示すように座標の原点を送信器Tの位置にとれば反射点Pの座標は次のように与えられる。

$$\left( \frac{\sin \phi_1 K_1}{2}, \frac{\cos \phi_1 K_1}{2} \right) \quad (5)$$

計測では送受信波の強度および経路通過時間が求まる。したがって(2)、(3)式より  $\phi_2$ 、 $\phi_3$  を算出し、これらを用いて(1)式を満足する  $\phi_1$ 、 $\ell$  を探索する。さらに(4)、(5)式より  $\theta$  および反射点Pの位置が求められる。

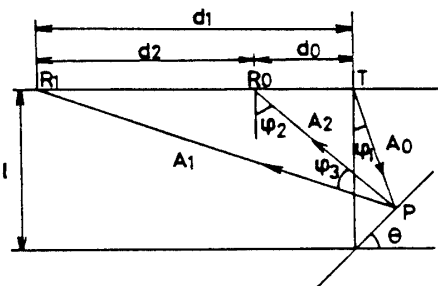


Fig. 1 Principle of the measurement.

3. 実験装置

3.1 測定装置

使用した超音波センサーは2枚の圧電セラミックスを互いの極性を逆にして接合したバイモルフ型素子である。センサーはケーシング外形が直径20mm、長さ15mmの円筒形で、指向性を高めるためにホーンが装着されている。基本的な性能を Table 1 に示した。測定装置の構成を Fig. 2 に示す。マイクロコンピュータからの出力信号によりタイムカウンターが作動を開始し、同時に、今回新しく作製したドライブセンシング回路によりセンサーが駆動され66kHzの超音波が発信される。被測定体で反射した超音波がセンサーにより受信されたとき、マイクロコンピュータがタイムカウントを停止させる。音の強度はレベルセンシング回路によって検知される。送信と受信は同一のセンサーによって行なった。

Fig. 3 は回路内での波形を示したものである。波形(a)はセンサーの送信・受信波形である。図中、①が送信波で、それより約7 msec後に被測定体からの反射波②が受信されている。波形(b)は波形(a)より得られたパルス信号で、これより受信波のみを取り出すために波形(c)のラッチリセットパルスがつくられる。したがって受信波がこのパルス幅以内にある場合には検出不能となり、音速を340m/secとすると本装置の不感距離は約0.46mとなる。取り出された受信波パルス(d)がタイムカウンターの停止信号となり超音波の送受時間が測定される。(e)は受信波を全波整流、平滑化の後ホールドしたものでこれよりレベルの検出が行なわれる。

使用した材料は砂で、その平均径、密度、安息角を Table 2 に示した。また、貯槽は前報<sup>5)</sup>と同じものを用いた。

3.2 測定手順

測定手順は Fig. 4 に示すように、

- (1) レベルセンシング回路のホールド回路部を初期化

Table 1 Specification of the sensor.

Frequency	66 (kHz)
Half width	6.8 (deg)
Side lobe	-18 (dB)
Transmitting sensitivity	118 (dB) (10V <sub>rms</sub> : L=30cm)
Receiving sensitivity	-30 (dB) (0dB=1V/Pa)
Rise time	0.15 (msec)

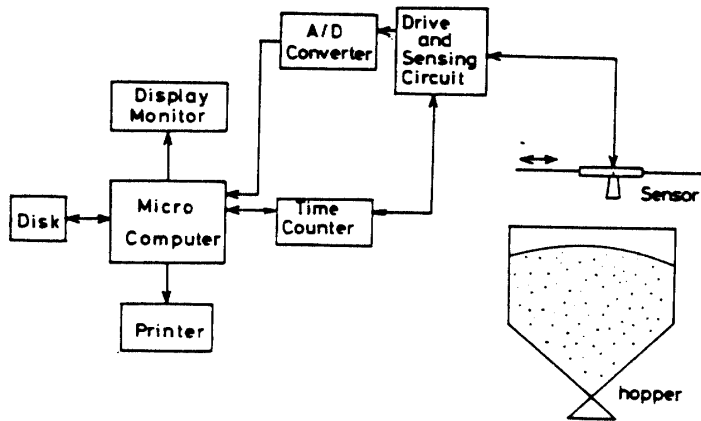


Fig. 2 Construction of the measuring equipment.

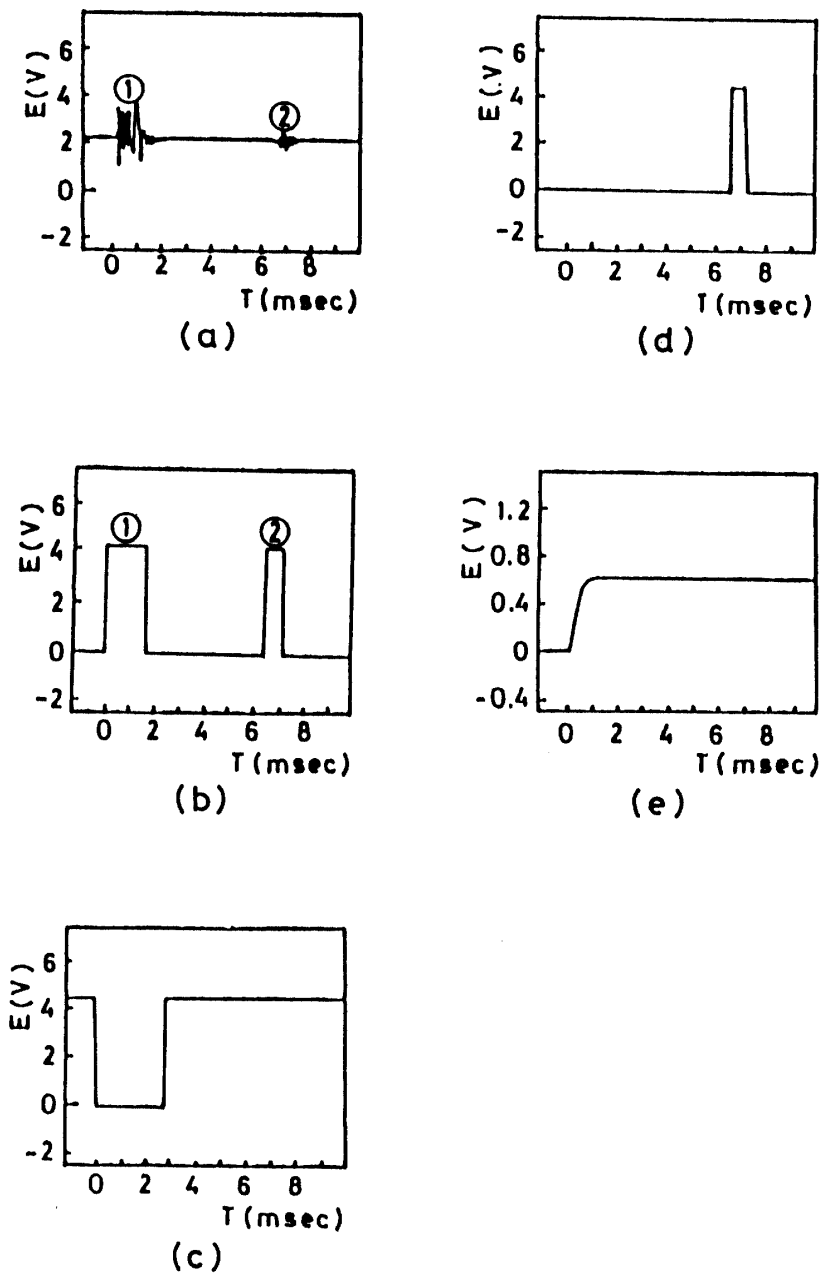


Fig. 3 Signals in the drive-and-sensing circuit.

Table 2 Properties of the sand.

Mean Diameter	0.317 (mm)
True Density	2.65 (g/cm <sup>3</sup> )
Bulk Density	1.37 (g/cm <sup>3</sup> )
Angle of repose	36.1 (deg)

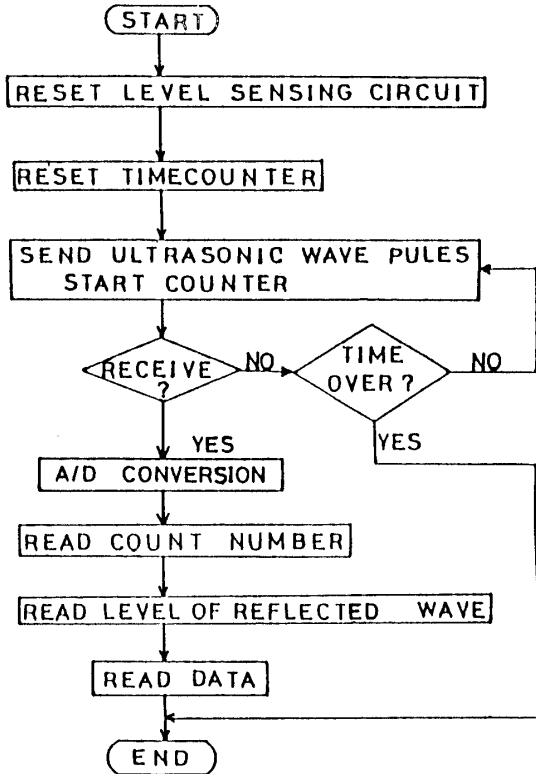


Fig. 4 Flow chart for the measurement procedure.

する。

- (2) タイムカウンターを初期化する。
- (3) 超音波パルスを発信する。
- (4) 反射波受信の判断をする
  - ①受信した場合：(5)へ進む
  - ②一定時間内に受信しない場合：測定不能と判断し(8)へ進む
- (5) 反射波の強度値をA/D変換する。
- (6) カウント数を読みとる。
- (7) 反射波強度を読みとる。
- (8) 終了

#### 4. 実験結果

##### 4.1 装置の基本特性

センサーの基本的性能を得るために周波数特性、指

向性、空気中での減衰、出力信号の強度と測定誤差について実測した。測定は全てホーンを装着した状態でおこなったものである。

Fig. 5にセンサーの周波数特性を示した。測定では2個の超音波センサーを1m隔てて向かい合わせて置き、周波数を64kHzから68kHzまで500Hzごとに変化させ受信波の強さを調べた。これより66kHzのとき感度が最大となり、帯域が65.1kHz~66.6kHzであることがわかる。

Fig. 6は指向性について測定した結果であり、距離2mのときのセンサーの中心方向(角度0度)の強さを基準値として表わした。半減角が5度とシャープな指向性を有していることがわかる。この実測結果にもとづいて指向性を円面状音源として次式で近似し<sup>6)</sup>Fig. 7に比較した。

$$D(\theta) = \frac{2J_1(2\pi(a/2\lambda)\sin\theta)}{2\pi(a/\lambda)\sin\theta} \quad (7)$$

実際の測定では(1)式中のセンサーの指向性に上記関係を用いて計算した。

Fig. 8に空気中における超音波の減衰特性を示した。2個のセンサーを向かい合わせて置き、その距離を60cmから200cmまで10cmごとに変化させた。測定中、周波数は66kHzで一定とした。実験値を次式で近似し、図中に実線で示した。

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \quad (8)$$

これより減衰係数は $\alpha = 1.106 [1/m]$ と求められた。

Fig. 9はセンサーの出力電圧Eと測定誤差L<sub>e</sub>の関係を測定した結果である。受信波強度が弱い場合には測定誤差は回路内の遅れ時間によるものと、レベルセンシング回路において検出信号がスレッショールドレベルに達するまでに要する時間によるものとが加算さ

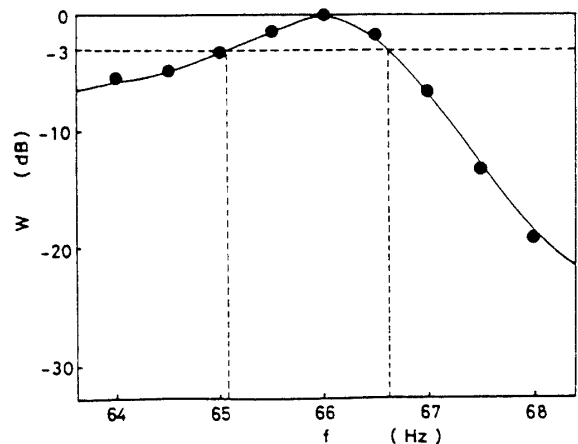


Fig. 5 Frequency characteristics of the sensor.

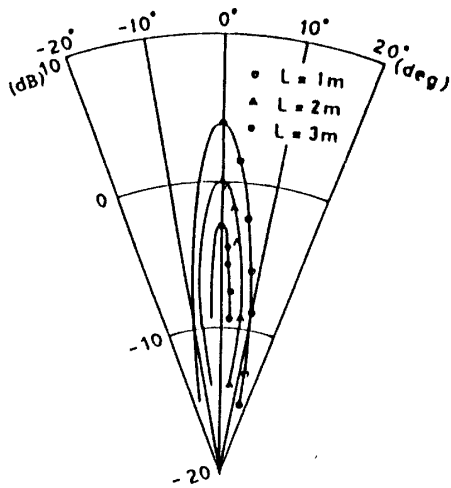


Fig. 6 Directivities of the sensor (1).

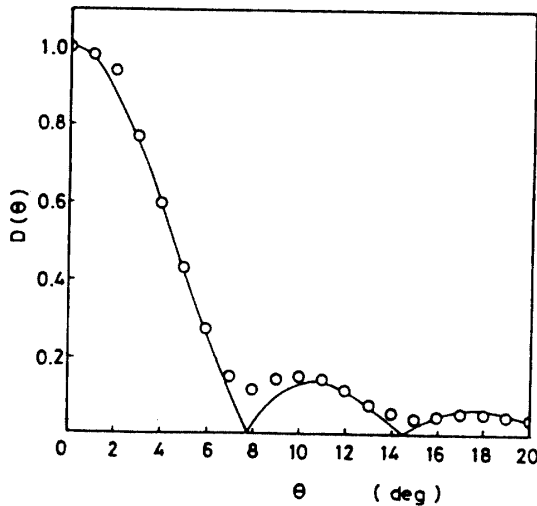


Fig. 7 Directivities of the sensor (2).

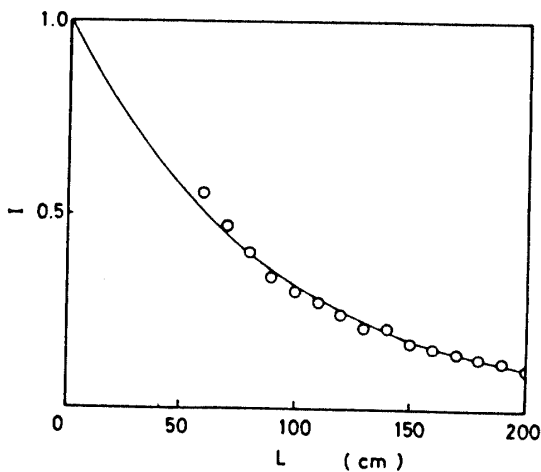


Fig. 8 Attenuation of the sensor.

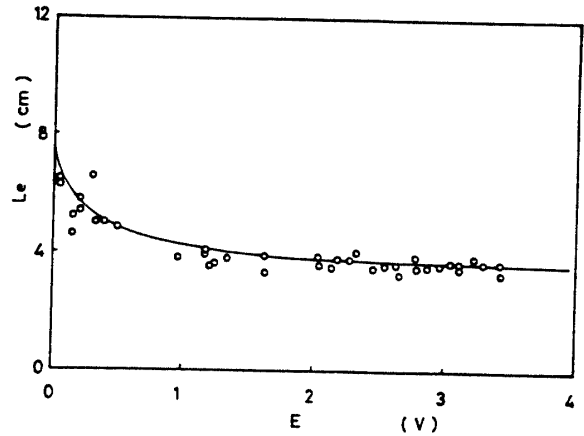


Fig. 9 Relationship between the measurement error and the sensor output.

れる。受信波強度が大きい場合は後者に起因する時間遅れは減少するため、測定誤差は主に回路自体の遅れ時間によるものとなる。図中、実線はデータを次式で近似したものである。

$$L_e = 1.2 / (E + 0.3) + 3.3 \quad (9)$$

実際の測定においてはこの式によって値を補正した。

#### 4.2 粉面の測定

試作した装置を用いて貯槽内の粉面を測定し性能を検討した。測定は貯槽の幅方向に2次元とし、側壁による乱反射の影響<sup>4),5)</sup>を考慮して両端部をのぞいた。粉面形状が平面、凹面、および凸面状の場合について、測定点間隔 $X_0$ を4 cm, 8 cm, 12 cm, および16 cmと変えて実測した。使用した材料は砂である。

Fig. 10は平面で $X_0 = 4$  cmの場合である。測定は離散的におこなわれ、それらを外挿して全体の形状を推定している。したがって求められたパターンは各点の粉面の粗さの程度すなわち反射特性が強調される傾向で描かれている。測定誤差は最大で約5 mm程度であり、実粉面形状をよく再現しているといえる。その他の $X_0$ における測定でもほぼ同様の結果を得た。

今回の方法によれば反射波強度を与える関係式より反射点の高さと面の傾斜が求められるが、同一のセンサーを送受に用いるとき、1個のセンサー側の指向特性のみを考慮すれば良いことから探索に要する時間が短縮されるという利点がある。しかしながら、この場合には傾斜角の正負の判断が不可能となるため、高さのデータから測定点相互の関係を考慮し、同時に粉体安息角より与えられる制約を考慮して形状の推定を行なう方法を採用した。Fig. 11は凹面の測定例である。面の端部 $x = 0$  cm付近で傾斜角約9度、 $x = 15$  cmで約

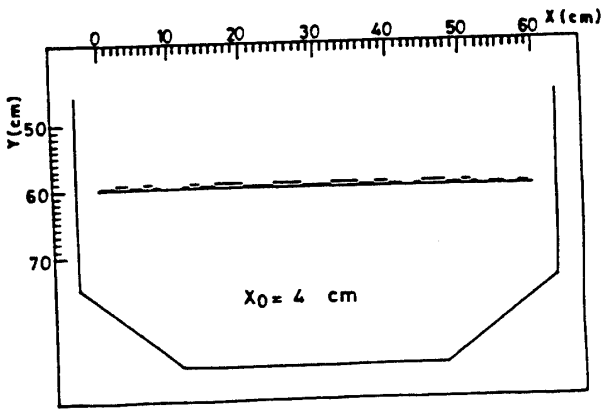


Fig. 10 Measurement for granular materials with flat surface pattern in a hopper.

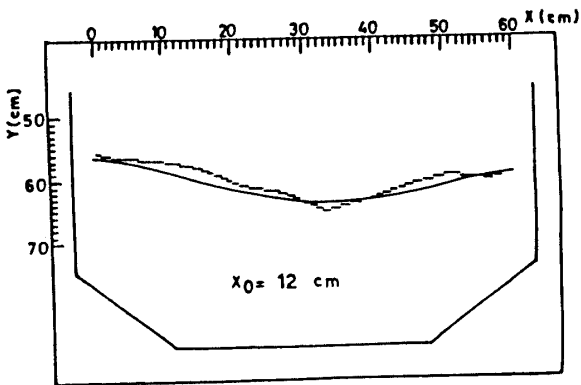


Fig. 11 Measurement for granular materials with concave surface pattern in a hopper.

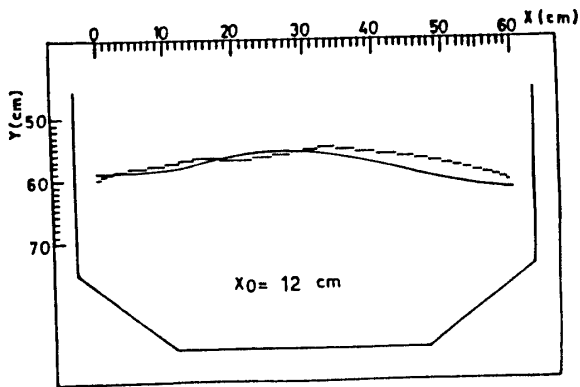


Fig. 12 Measurement for granular materials with convex surface pattern in a hopper.

18度である。中央付近で測定値が実粉面より下方側に推定されくぼみの深い形状となったのは、測定点がこの位置上になく両端からの外挿により描かれたためである。全体としては実距離より小さく推定される傾向

にあり、これは得られる強度が理論値に比べて大きいことを意味している。平面の場合に比較して誤差は増大しているがおおむね実粉面をよく再現している。また Fig. 12は凸面形状の測定例である。面の傾斜は  $x = 8$  cm付近で約10度、 $x = 16$  cmで12.6度、また右側  $x = 42$  cm付近で13.6度である。凹凸両面の結果を比較すると全般に凸面の場合が測定精度が良好であった。これは凹面では多くの点からの反射がセンサー側へ集中し、これらの重畳波が受信されるため凸面の場合より誤差が大きくなると考えられる。このような複数の点からの反射については各々の経路が異なるため時間および強度が異なる。したがって、受信時間と強度の両者にある制約条件を付加することによってこの種の誤差を除去し得る可能性がある。また誤差を生ずる他の原因としては指向特性におけるサイドロープの影響が考えられる。本センサーでは約7~11度の位置にややフラットな特性がみられ、したがってこの角度範囲では検出の分解能が低下すると考えられる。さらに実験粉面の奥行き方向の傾斜の影響も考えられる。すなわち、仮に奥行き方向に受信波強度が減少する形状を有する場合には、2次元とみなす場合よりも、傾斜角を大きく、もしくは距離を長く推定する可能性がある。

### 5. 結 言

超音波による貯槽内粉面形状の測定について、今回主に計測時間の短縮をはかる目的から、反射波強度と音波往復時間より粉面の位置と傾斜角度を推定する方式を提案し、その適用性について実験的に検討した。狭指向性のセンサーを用いたモデル環境での実測結果によれば、精度的にはまだ問題を残すが、粉面パターンをおおむね良好に推定し得ており、本方式が有用であることが確認された。実用に際して3次元へのアルゴリズムの拡張、および複数のセンサーによる同時多点の計測が必要となるため、今後、異なる周波数帯の使用等、センサー相互の干渉を除去するシステムの開発が重要となる。また、精度を向上させるために本方式を基礎に複数の受信点による計測方法も検討する必要があると考える。

最後に本実験を担当した62年度卒業生の藤原敦君に謝意を表します。

### 主 な 記 号

- a : 振動板半径
- D : 指向性
- $d_0$  : 送・受信器間距離

E : 出力電圧  
I : 超音波の強度  
 $J_1$  : 第1種ベッセル関数  
L : 経路長  
 $L_0$  : 測定誤差距離  
 $l$  : 距離  
R : 反射特性  
 $X_0$  : センサー測定間隔  
 $\alpha$  : 減衰係数 (空気中)  
 $\theta$  : 粉面傾斜角  
 $\lambda$  : 波長  
 $\phi$  : 角度  
添字  
 $R$  : 受信器

T : 送信器

#### 参考文献

- 1) 自動化技術編集部編：センサ技術，工業調査会 (1983)
- 2) 丹波登：長音波計測，昭晃堂 (1987)
- 3) 小久保 実：化学装置，6 (1984)
- 4) 森元映治：早野延男：山口大学工学部研究報告，36, 1 (1985)
- 5) 森元映治他2名：山口大学工学部研究報告，38, 2 (1988)
- 6) 早坂壽雄，吉川昭吉郎：音響振動論，丸善 (1974)  
(昭和63年4月15日受理)