

# 超音波による貯槽内粉面形状の計測

森元映治\*・早野延男\*

## Measurement of Granular Surface Pattern in a Hopper by Ultrasonic Wave Sensor

Eiji MORIMOTO and Nobuo HAYANO

### Abstract

Fundamental characteristics for pattern recognition of granular surface in a hopper by ultrasonic wave sensor was investigated experimentally for the purpose of developing the detector as a control unit. Results showed rise time of output voltage from the receiver affected directly the accuracy of measurement. Directivities of the sensing units have been improved by installing the conical shaped horns in front of both the transmitter and receiver. Experiments on the effect of the pulse wave length on the strength of its reflection from object indicated that duration time more than  $300 \mu\text{sec}$  was sufficient to reach the threshold level. Measurement error which was due to the irregular reflection from the particle surface and inner wall surface was reduced by arranging the four receivers around the emitter.

### 1. 緒言

貯槽内の粉粒体の量を粉面レベル値から求めようとするとき、流体の場合とは異なり粉面が起伏を持つため、精度を高めるためには、多くの位置での値を知る必要がある。特に流入、流出をともなう場合には変化する粉面形状を短時間で計測することも重要となる。超音波センサーは機械的可動部がないため発塵性、付着性のある材料に対しては有利で、光学式等のようにガラス面の付着や散乱によるトラブルを回避でき、無接触であるため迅速で連続的な測定が可能である<sup>1)2)</sup>

本研究は制御用検出端としての開発を目的として超音波センサーによる離散的測定点群からの粉粒体面の形状認識の基本的特性と、その計測上の諸問題について実験的検討をおこなったものである。

### 2. 実験装置

#### 2.1 測定原理

Fig. 1 のように超音波送信子  $T_m$ 、受信子  $R_m$  を被測定体から  $X$  の位置に  $2D$  の間隔をおいて設置する。超

音波の伝搬速度を  $v$  とし、 $T_m$  から発射され被測定体で反射したのち  $R_m$  に受信されるまでの時間を  $T$  とすれば、距離  $X$  は次式より算出される。

$$X = \sqrt{\left(\frac{vT}{2}\right)^2 - D^2}$$

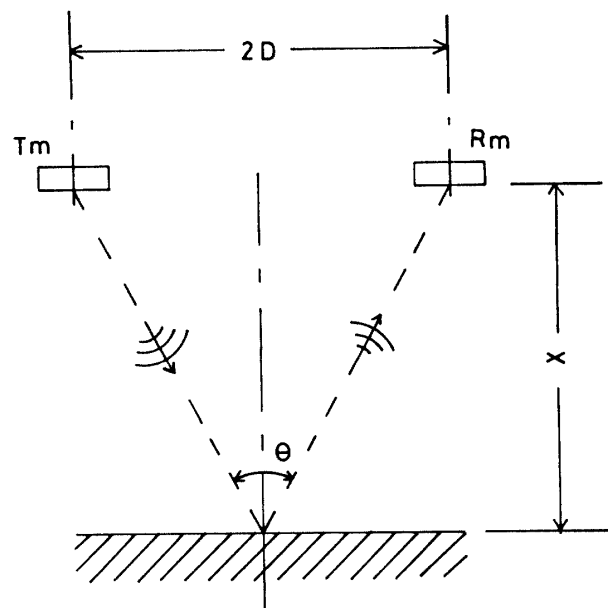


Fig. 1 Principle of measurement

\*生産機械工学科

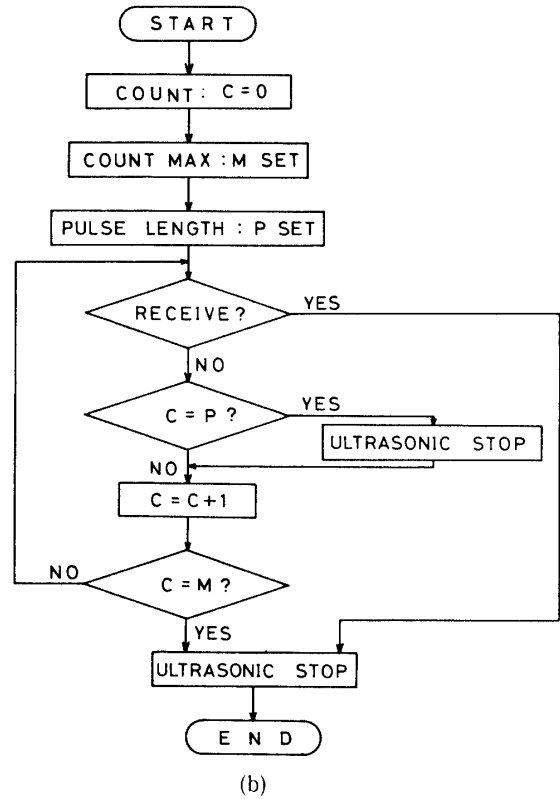
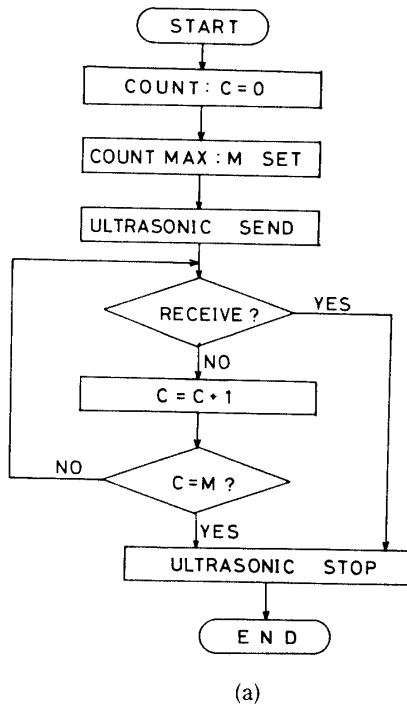


Fig. 2 Flow chart for the procedure of measurement

2.2 測定用プログラム

測定用プログラムを Fig. 2 に示す。ここでは超音波を発信し測定の終了まで発信を継続させる方法、およびパルス状の超音波を発信する方法の2通りを用いた。Fig. 2(a)は前者の方法のフローチャートである。カウンタレジスタをクリアし、最大カウント数  $M$  をセットしたのち超音波を発信し、カウントを開始する。反射波の受信によってカウントを停止し、送受信の時間間隔をカウント数より算出する。Fig. 2(b)は後者の場合で、(a)のプログラムにパルス長さを設定し発信開始から一定時間ののち停止するループが付加されている点のみが異なっている。

ブ回路およびセンシング回路によって駆動され、PIA を介してマイクロコンピュータ (H68/TR) によって

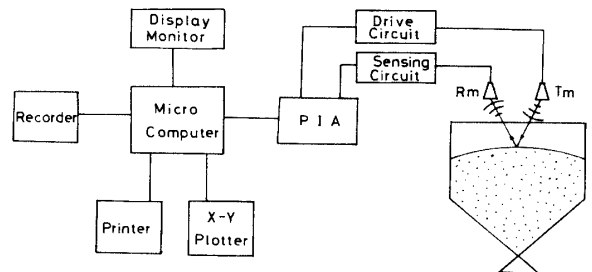


Fig. 4 Experimental apparatus

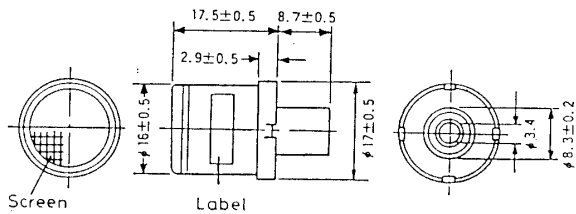


Fig. 3 Ultrasonic wave sensor

2.3 実験装置

今回使用した超音波送受信子は周波数 40 kHz のバイモルフ振動子である。その外形寸法を Fig. 3 に示す。また実験装置の構成を Fig. 4 に示す。センサはドライ

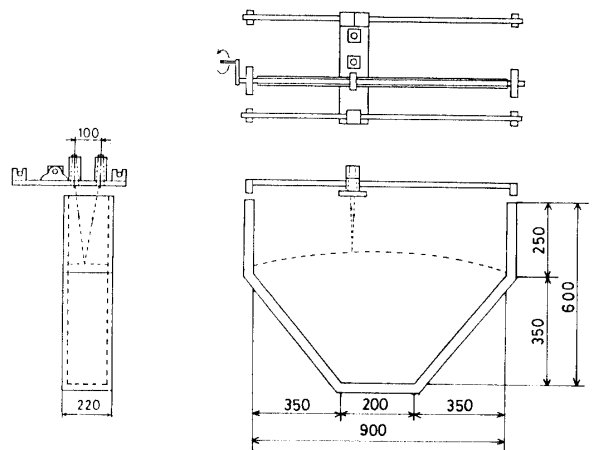


Fig. 5 Illustration of the hopper and sensing units

計測処理をおこなう。

Fig. 5 は貯槽内の粉粒体表面形状の計測に用いた装置で、貯槽上部の3本のガイド棒に沿ってセンサを移動させ得ようになっている。

測定の対象物としては基本的特性に関する実験ではアクリル平板とスチール製円柱を用いた。また貯槽内粉粒体に関する計測では主に粒径の影響をみるため、小麦、砂、ナイロンチップを使用した。各粉粒体の平均径はそれぞれ  $140\ \mu\text{m}$ 、 $317\ \mu\text{m}$ 、 $2900\ \mu\text{m}$  である。

### 3. 実験結果

#### 3.1 基礎実験

3.1.1 平板による直線距離の計測 超音波センサーと平板との距離を  $30\ \text{cm}$  から  $100\ \text{cm}$  まで  $5\ \text{cm}$  ごとに測定した。センサー・平板間の実際の距離  $X$  と

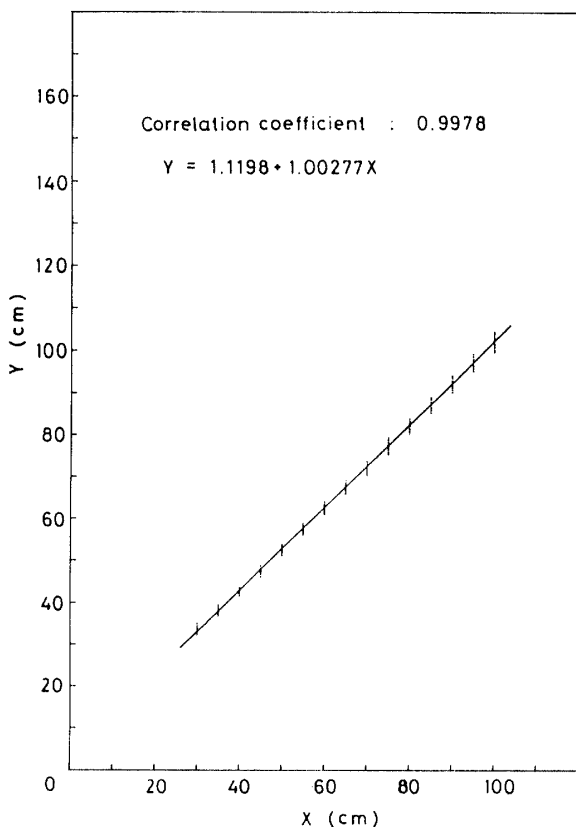


Fig. 6 Correlation of the distance from sensor to object and its measured value

その測定値  $Y$  との関係を図.6 に示す。図の直線は最小二乗法による相関式を表わす。受信子は圧電セラミクスに音圧により生ずる歪により電圧を発生し、その値がスレッショールドレベルに達した時点で反射波検知信号を出力する。このため真の送受信時間間隔

に比べて計測される時間間隔は長くなり、実際の位置より遠くに平板を認識している。この誤差は平板の距離が長くなるにつれ、反射波の強度が低下するため大きくなると予想されるが今回の実験の範囲内ではほぼ一定であった。

3.1.2 段差のある壁面の計測 段差  $20\ \text{cm}$  の壁面を Fig. 7 のように送受信子に対し遠い側の壁との距離を  $30\ \text{cm}$ 、 $60\ \text{cm}$ 、 $90\ \text{cm}$  として測定した。平面部分の形状はセンサーとの距離が近いほど良好に検出された。ここでは3.1.1で得られた  $X$ - $Y$  の相関式を補正のために用いている。段差部の認識は近距離なほど良好で、遠くなるほど超音波が広がり乱反射が増加するため異常値を示し、検出不能となる傾向を示した。

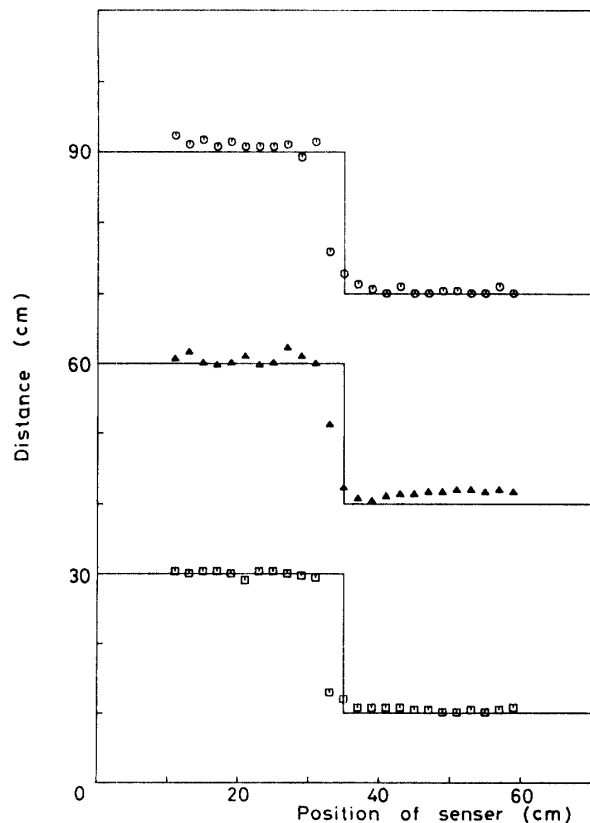


Fig. 7 Recognition of the step

3.1.3 壁面の前に置いた円柱の計測 Fig. 8 のように平板の前に直径  $21\ \text{cm}$  の円柱を置いて測定した。平面壁との距離は  $30\ \text{cm}$ 、 $60\ \text{cm}$ 、 $90\ \text{cm}$  とした。円柱の認識は正面中央の部分で概略を判断できるが、平板からの干渉のため円柱の両端部では異常値が計測された。特にセンサーとの距離が遠いほど、物体の存在は認められても、円柱であることの認識は困難であった<sup>3)</sup>。

3.1.4 ホーンの効果 今回用いた送受信子の指向角は約  $52^\circ$  と広く<sup>4)5)</sup> したがって距離の測定精度を高

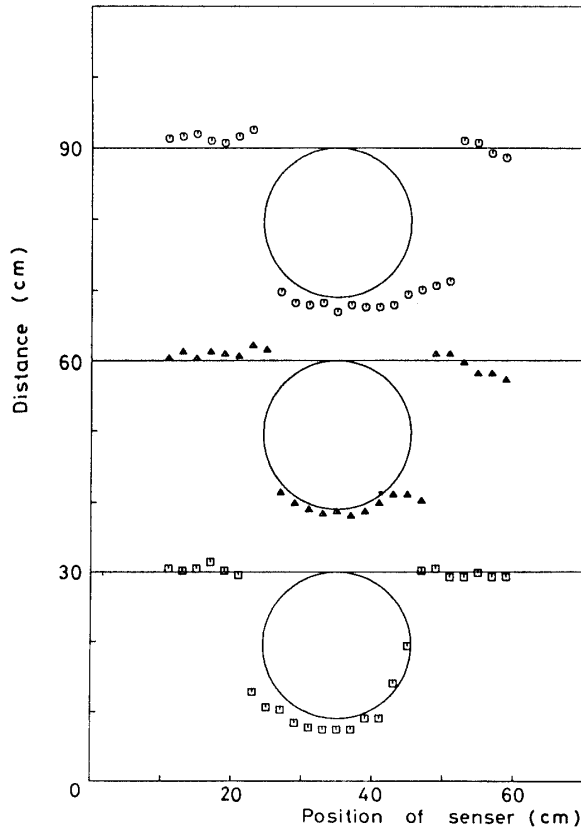


Fig. 8 Recognition of the cylinder in front of wall

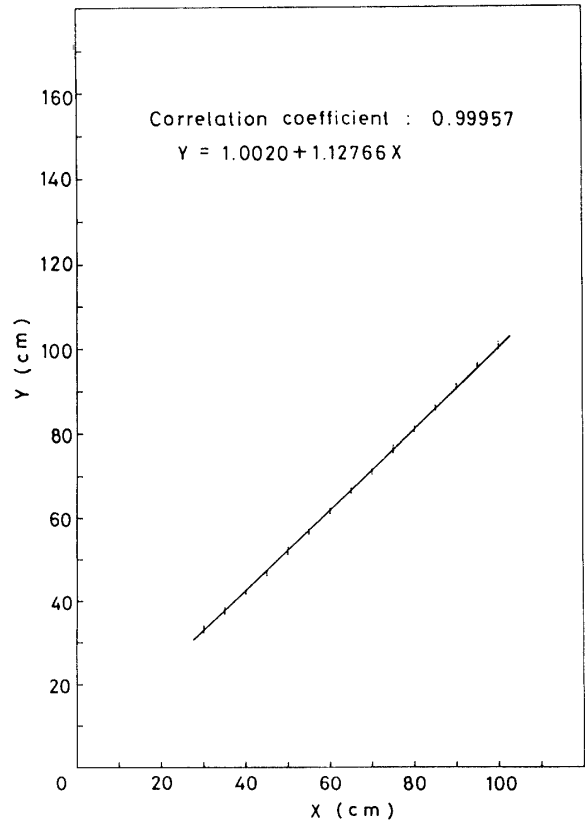


Fig. 10 Effect of the horn

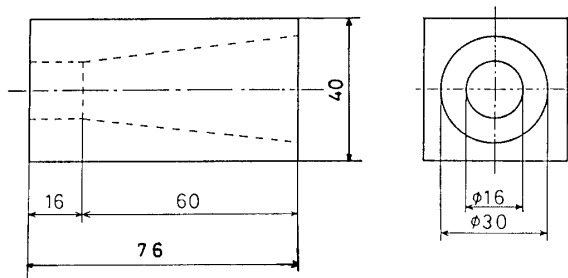


Fig. 9 Horn attached to the sensor

めるためにホーンを取付けて指向性の改善をはかった。ホーンの寸法外形は Fig. 9 のような円錐形のアルミ製である。ホーンの効果を知るため平板との距離を測定した結果を Fig. 10 に示す。直線距離 30~200 cm まで 10 cm おきに測定し、誤差 10 cm 以内の計測値が得られる割合を比較した。この結果、近距離ではホーン有無の差はほとんど認められなかったが、100 cm 以上の遠距離ではその効果は著しく、200 cm 以上の距離ではホーンを取付けることにより計測ミスを以下に低減することができた。Fig. 6 と Fig. 10 の比較から、同一距離での測定値のばらつきがホーンによって減少していることがわかる。

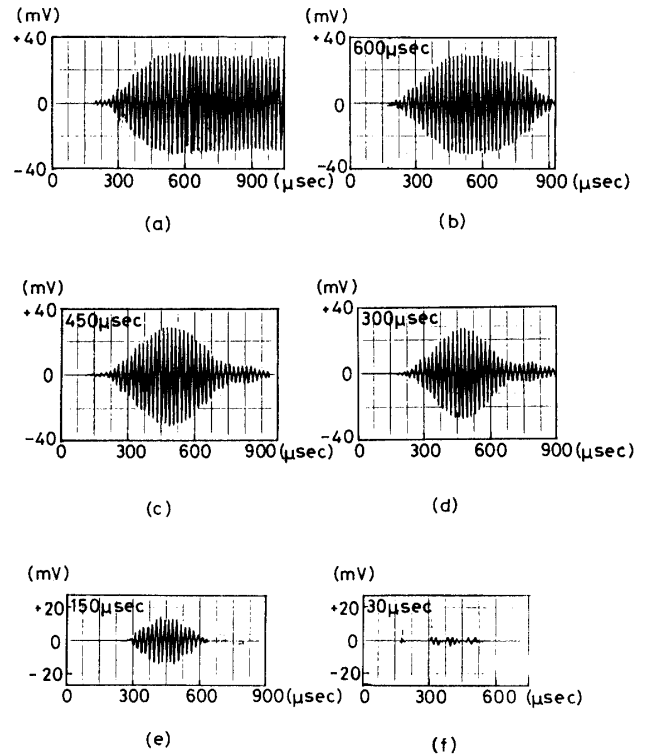


Fig. 11 Relationship between pulse length and strength of reflection

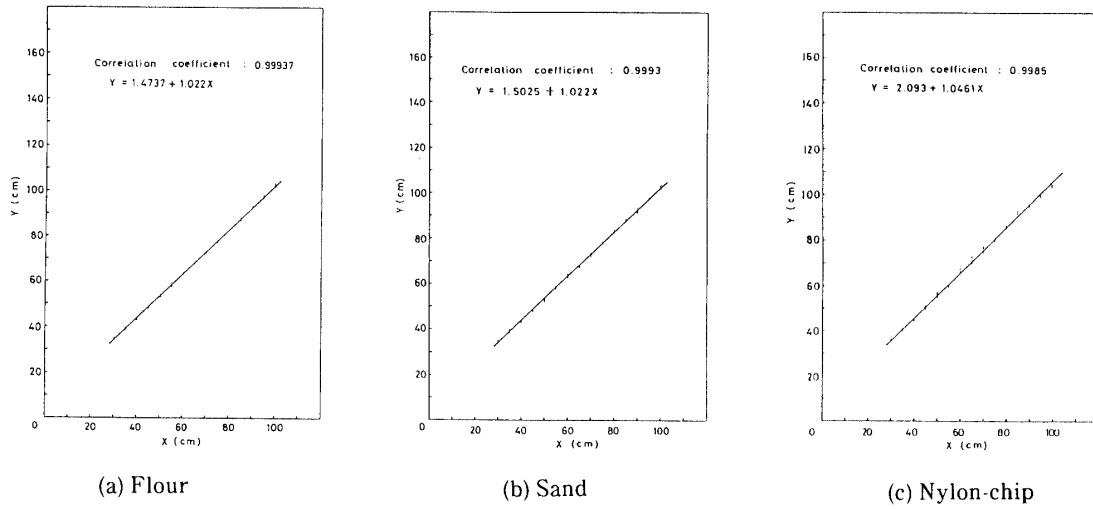


Fig. 12 Measurement for granular materials

**3.1.5 パルス長さ** 測定精度を高めるためには1点に対し複数回の測定を行なうことが好ましく、このため送信子からの超音波出力はパルス状であることが望ましい。さらに一定時間内での測定回数を高めるためにはパルス長さを短くする必要があるが、極端に短い場合には反射波の強度が低下してセンシング回路のスレッシュホールドレベルに達する受信子出力を得ることが不可能となる恐れがある。Fig. 11はパルス長さを変えた場合の受信子出力電圧波形をみたものである。Fig. 11(a)はパルス長さが無限大、すなわちステップ状の超音波を出力した場合で、スレッシュホールドレベルに達するまでに約210 $\mu$ sec要している状態を示している。Fig. 11(b)~(f)はいずれもある時間だけパルス状に出力した場合で、パルス長さは600 $\mu$ sec~30 $\mu$ secである。150 $\mu$ sec以下ではスレッシュ

ホールドレベルに達する前に減衰するため受信の検知がおこなわれず測定不能となる。したがって本実験の範囲からパルス長さ300 $\mu$ secとすることが望ましいといえる。

**3.1.6 粉粒体による反射** 平らな粉粒体の表面とセンサーの距離を30cm~100cmまで5cmごとに測定した。使用した材料は小麦粉、砂、ナイロンチップの3種で、それぞれの結果をFig. 12に示す。平板の場合と比較していずれの材料の場合も測定距離が長くなっている。これは粉面での乱反射や吸収によって減衰され、スレッシュホールドレベルに達するまでの時間が長くなったことによると考えられる。また粒径の小さいほど測定値のばらつきも少なく、測定誤差も小さい傾向を示した。

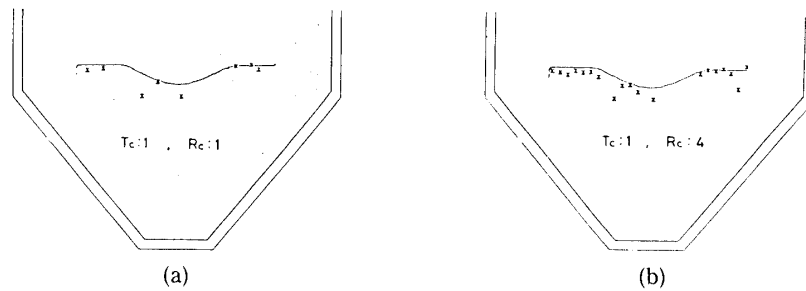


Fig. 13 Comparison of the detecting systems

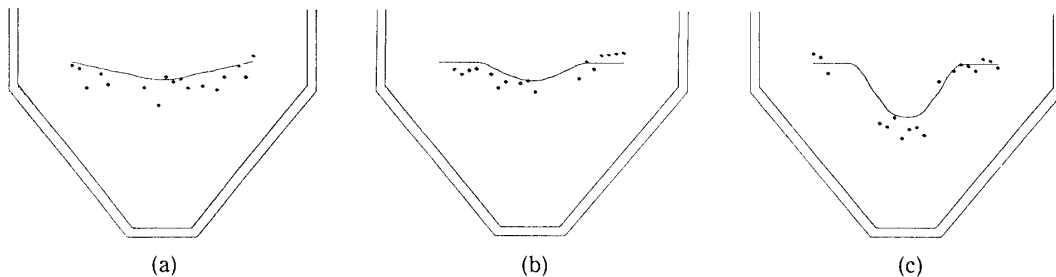


Fig. 14 Granular surface in a hopper (Flour)

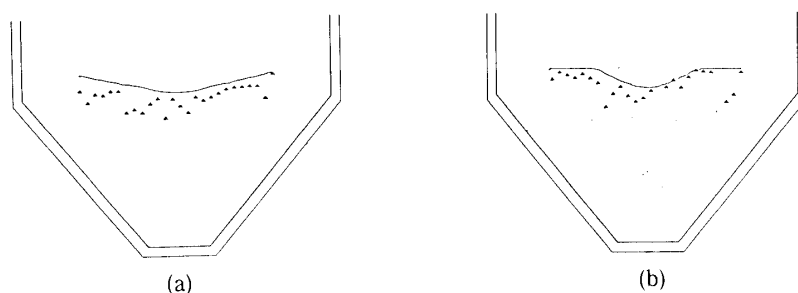


Fig. 15 Granular surface in a hopper (Sand)

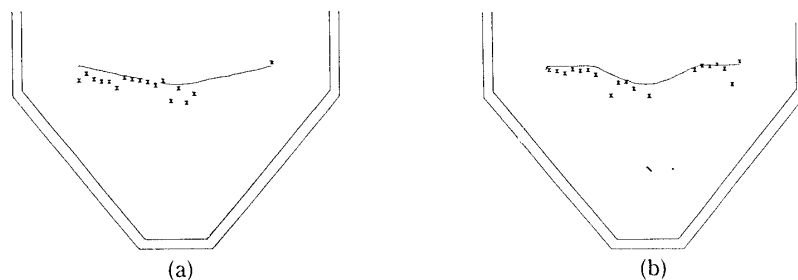


Fig. 16 Granular surface in a hopper (Nylon-chip)

### 3.2 貯槽内の粉面形状の計測

**3.2.1 受信方法** 以上の基本的特性をもとに貯槽内での粉面形状の計測特性について検討した。貯槽内では側壁からの乱反射による受信状態の劣化が予想される。その改善策として送信子1個に対し受信子を複数個配置し受信確率を高めることを試みた。受信子が1個の従来方式の場合と、送信子の周囲に受信子を4個配置した場合の測定結果を Fig. 13 に比較した。槽内左右の側壁に近接する部分は極端な乱反射の影響を受けるため計測の対象とせず、中央部を等間隔に24点測定した。Fig. 13(a)は送・受信子個数1:1の場合で、Fig. 13(b)の4:1の方式に比べて反射波の得られない場所が多いことを示している。改良された受信方式では、センシング回路に対し受信子4個を並列に接続することによって従来方式と同じプログラムを使用することができた。

**3.2.2 粉面形状の計測** 先の結果より送受信子個数4:1の方式によって3種類の粉粒体の粉面形状を計測した。粉面形状は通常貯槽内での流出時に生じるパターンを想定した。小麦粉、砂、ナイロンチップの結果をそれぞれ Fig. 14, 15, 16 に示す。実距離との測定誤差の平均値は各材料でそれぞれ約3 cm, 2 cm, 4.5 cmで、これらを貯蔵全体積に対する測定誤差とすると小麦粉および砂で約10%, ナイロンチップで15%となる。距離としての測定誤差は粉面位置にかかわらず各材料でほぼ一定であることから、貯蔵体積が実験例より大きい場合には誤差率は低減する。一般に貯槽内での粉面の形状は複雑なものではなく、凹凸は

あるが連続したなだらかな曲線となる。その形状は流入出の条件が与えられれば、粉体の種類によってパターン化され、一部の曲線から全体を推定し得る場合が多い。したがって測定データ点群に適切な補間をおこなうことによって、表面形状を実用上問題のない精度で認識することが可能であるといえる。

## 4. 結 言

超音波センサーを用いて貯槽内粉面形状を計測する際の基礎的特性と応用上の問題点について検討した。結果を以下に要約する。

- (1) 受信子が反射波を検知し出力電圧がスレッショールドレベルに達するまでの時間が距離測定誤差の主な原因となる。
- (2) 段差のある壁では測定距離1 m以内のときその形状を精度よく認識できる。また壁面の前の円柱に対する形状認識は段差壁に比べて精度が悪く、特に遠距離になるほどこの傾向は強い。
- (3) 送受信子の指向性を改善するためにホーンをとりつけた結果、同一距離に対する測定値のばらつきが減少した。
- (4) 送信波のパルス長さと反射波の強度の関係について検討し、パルス長さが300  $\mu$ sec以上であればスレッショールドレベルに達する出力電圧を得ることができる。
- (5) 粉粒体を測定対象とする場合、表面での乱反射、吸収のため反射波強度が低下し平板壁の場合より測

定精度は劣化する。

- (6) 貯槽内での乱反射の影響を、受信子 4 個を送信子の周囲に配置することで低減し得た。

最後に本研究で使用した装置の製作に御協力いただいた生産機械工学科技官，糸井茂氏ならびに卒業研究として御協力いただいた同学科の射手園尚孝君，田中重信君に深く感謝の意を表します。

#### 参 考 文 献

- 1) 谷沢公彦：計装，**9**，83 (1968)
- 2) 小久保実：化学装置，**6**，63 (1984)
- 3) 油田信一：センサー技術，**1**，37 (1982)
- 4) 田渕恵三他 2 名：テレビ技術，**4**，63 (1981)
- 5) 丹羽登：ライフサイエンスを測る，オーム社 (1983)  
p. 18

(昭和60年 4 月15日受理)