

超音波による貯槽内粉面形状の計測 (第2報)

森元 映治*・糸井 茂*・早野 延男*

Measurement of Granular Surface Pattern in a Hopper by Ultrasonic Sensor (The 2nd Report)

Eiji MORIMOTO, Shigeru ITOI and Nobuo HAYANO

Abstract

The ultrasonic sensor has been developed as a detecting element to recognize the granular surface pattern in a hopper. The equipment and the measuring algorithm were improved on the basis of the results obtained from the original system. Narrow directivities of the emitter and the receiver have reduced the measurement error due to the echo from the inside hopper wall. Output voltage of the receiver was enhanced to shorten the lag time which emerged in the signal level sensing circuit. The inclination angle of the surface was detected by the swinging method, which also decreased the receiving error of the reflected wave. The resolution of the time measurement was one microsecond utilizing the time counter circuit. Experimental results were shown for the fundamental surface condition and for the application to a hopper system.

1. 緒 言

超音波センサーは露出した機械的可動部がなく、小型で、無接触での計測が可能であるため、貯槽内の粉粒体を対象とする場合のように発塵、付着が問題となるような環境での使用に適している^{1),2)}。前報³⁾では制御用検出端として粉面のパターンを認識する素子の開発を目的とし、試作したセンサーの基本特性と貯槽への適応性について実験的に検討した。その結果、粉粒体表面の乱反射による測定への影響が大きく、粒径によって計測精度が異なること、貯槽の内壁近傍ではエコーにより正確な測定が困難なこと、計測点外からの反射波が混入すること等が問題となった。さらに粉面の傾斜勾配の大きい点では反射波強度が極度に低下するか、あるいは受信不能となり、認識されたパターンの一部が欠如する場合があった。本報ではこれらの点をふまえて、新たに装置および周辺回路部に改良を試みその

性能について検討した。

2. 測定装置および方法

2.1 超音波センサー

超音波センサーには、2枚の圧電セラミックスを極性を逆にして接合したバイモルフ形素子^{4),5)}を用いた。電圧を印加することによって各々のセラミックスが伸縮し、振動子は屈曲運動する。振動の腹の部分に結合された振動板によって超音波が発生する。同一素子で送波と受波の機能を兼ねており、受波時にはこの逆の原理により、素子両端に電気信号が誘起される。Fig. 1に形状を示す。また、基本的な性能をTable 1に示した。

Fig. 2に実験装置を示す。センサーはドライブ回路によって $V_{p-p}=30V$ で駆動される。センシング回路では受信された信号がスレッショールドレベルを越えれば超音波を受信したと判断し、受信信号を増幅・平滑化し5Vの電圧を出力する。超音波の送受に要した時間は、今回新たにカウンター回路をもうけて測定した。

*生産機械工学科

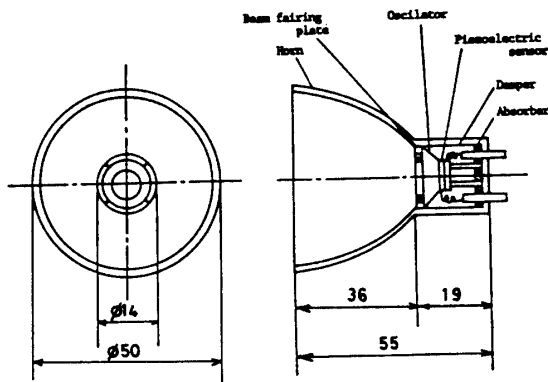


Fig. 1 Ultrasonic sensor

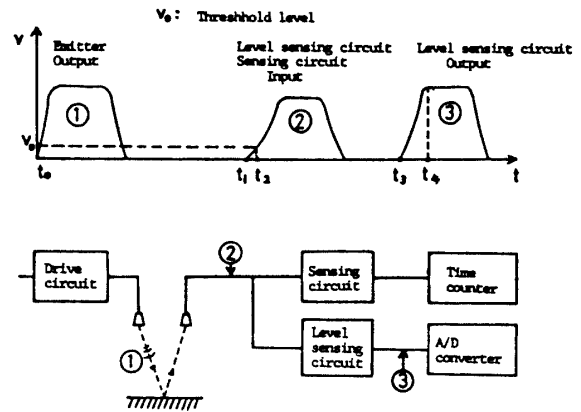


Fig. 3 Procedure of the measurement

Table 1 Specification of the sensor

Frequency	64 kHz
Half width	6.8 deg
Side lobe	-18 dB
Transmitting sensitivity	118 dB ($10V_{rms} : L=30cm$)
Receiving sensitivity	-30 dB ($0dB=1V/Pa$)
Rise time	0.15 msec

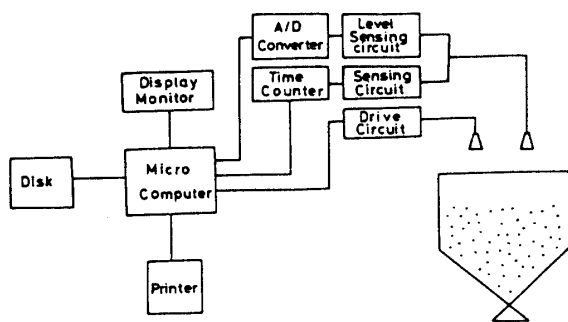


Fig. 2 Experimental apparatus

この回路は16ビットカウンター（計数値は最大65535）でカウント周期は $1\mu sec$ である。レベル検出回路は反射波の強度を検出するためのもので、受信信号を増幅・平滑化の後、A/D変換器に送る。

2.2 測定原理

測定手順をFig. 3に示す。ドライブ回路によって64 kHzの送信信号①が時刻 t_0 でセンサーより出力される。

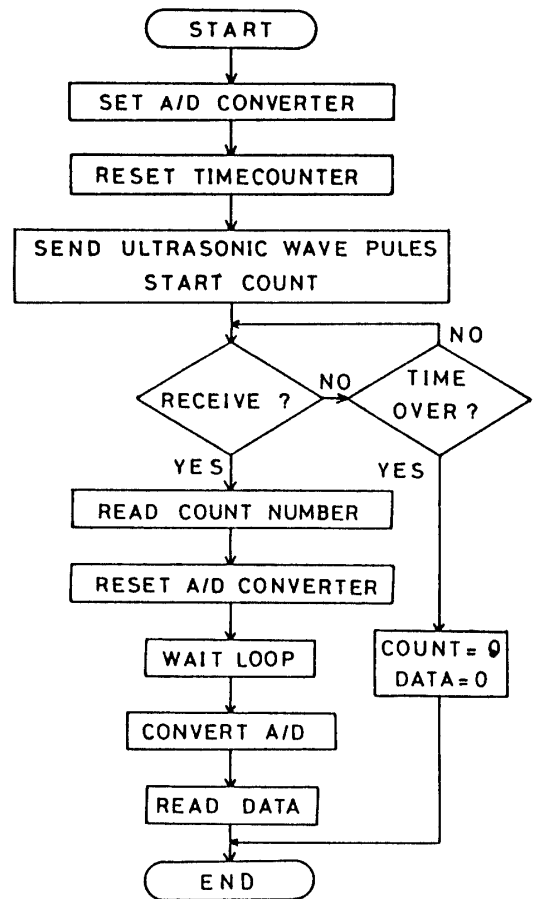


Fig. 4 Flow chart for the measurement procedure

カウンター回路はこれと同時に時間のカウントを開始する。被測定体で反射された超音波は再びセンサーに戻り受信され、この信号②がセンシング回路とレベル検出回路に同時に送られる。センシング回路では時刻 t_2 で受信信号がスレッシュホールドレベルに達し、5 V

の電圧をカウンター回路に送り、カウンター回路の時間カウントを停止させる。したがって計測時間は $(t_2 - t_0)$ となる。レベル検出回路では時刻 t_1 で入力パルス信号を受けとり、時刻 t_3 で反射波レベルとしてパルス信号③を出力する。さらに時刻 t_4 でA/D変換器に取り込まれる。

測定用プログラムのフローチャートをFig. 4に示した。

- (1) A/D変換器を初期化する。
- (2) タイムカウンターを初期化する。
- (3) 超音波パルスを出力し、同時に時間のカウントを開始する。
- (4) 反射波受信の判断をする。
 - (a) 反射波を受信した場合は、(5)へ進む。
 - (b) 一定時間内に反射波を受信しない場合は、測定不能と判断し、終了する。
- (5) A/D変換器をリセットする。
- (6) 波形③の反射波レベルが十分立ち上がるまでプログラム・ループを回して待つ。
- (7) 反射波レベルのA/D変換をおこなう。
- (8) 反射波レベルのデータ値を読みとり、終了する。

2.3 材料および貯槽

測定の対象となる材料としては、前報³⁾と同様に粒径による影響をみるため、平均粒径 $317\mu\text{m}$ の砂と円筒形(直径 $2.6\text{mm} \times$ 高さ 2.4mm)のナイロンチップを用いた。Table 2に特性を示す。前回用いた小麦粉は湿度の影響を受けて凝集し易く、貯槽での流動性が極めて低く、実験上制約が多かったため使用しなかった。貯槽はFig. 5に示すように前回と同様のものを用いた。

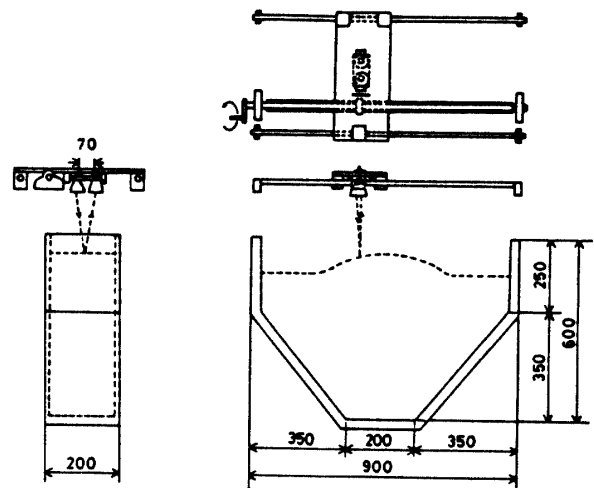


Fig. 5 Illustration of the hopper and the sensor

3. 実験結果

3.1 基礎実験

3.1.1 指向性

本装置は貯槽の内部にある粉体を測定対象としている。したがって容器側壁からの乱反射による影響が大きく、精度の劣化をまねく原因となるためセンサーとしては狭指向性を持つものが好ましい。Fig. 6は使用したセンサーの指向性について測定したもので、距離2mのときセンサーの中心方向(角度0度)の値を基準として表わしたものである。半減角(中心方向の値より -3dB 減少する角度)は約 5° とシャープな検出が可能であることが分かる。

3.1.2 反射波の強度

センサーと被測定体までの距離を50cmから65cmまで

Table 2 Properties of the materials

	Mean Diameter (μm)	Density (g/cm^3)		Angle of repose (deg)
		True	Bulk	
Sand	317	2.65	1.37	36.1
Nylonchip	2610 (Diameter) 2430 (Height)	1.10	0.73	32.0

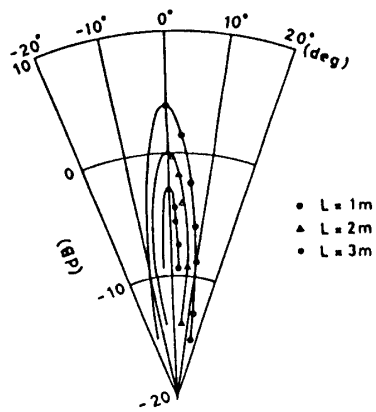


Fig. 6 Directivities of the ultrasonic sensor

1cmごとに変えて受信される反射波の強度を測定した。Fig. 7のように測定範囲内で平板、砂、ナイロンチップともほぼ一定の反射波強度を得た。乱反射のため粒径の大きいほどデータのばらつきが大きい。

Fig. 8はセンサーと被測定体までの距離を同様の条件で距離を測定した結果である。被測定粉面の状態が粗いほど測定のばらつきが大きくなるのは強度に関する測定結果と同じである。測定された距離が実距離より長くなるのは、センシング回路での信号がスレッシュホールドレベルに達するまでに要する時間が含まれているためである。このため受信される反射波の強度が強い方が信号の立ち上がりが速やかになり、測定精度が向上する。被測定体が粉体の場合、表面が凹凸を持つため反射強度が低下する。したがって砂、ナイロン

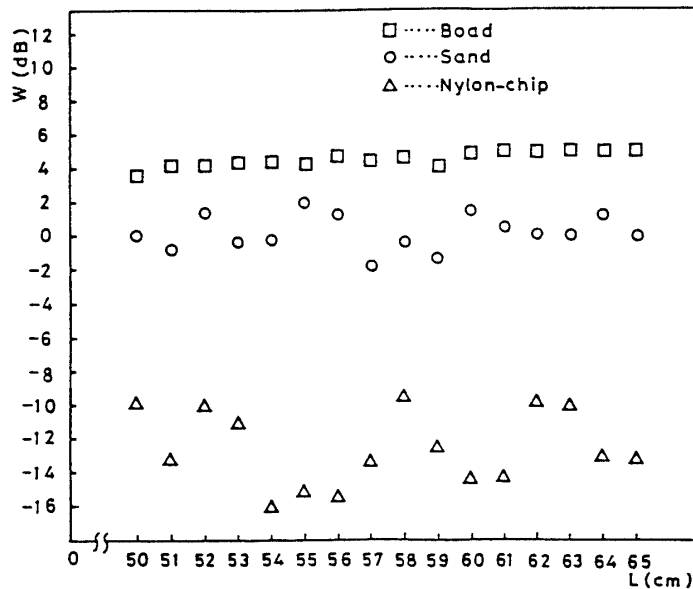


Fig. 7 Relationship between the strength of the reflected wave W and the distance L

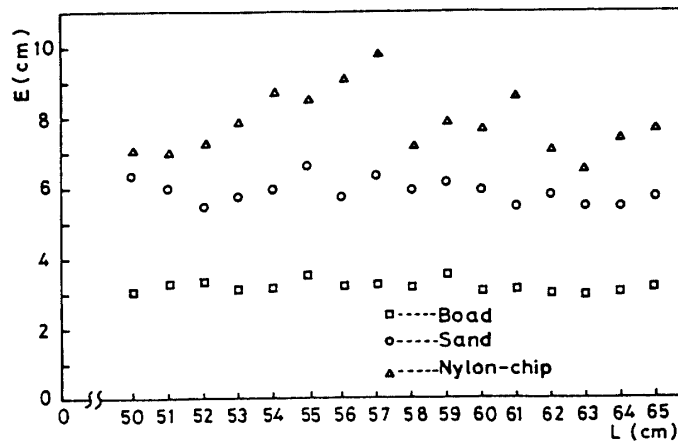


Fig. 8 Relationship between the measurement error E and the distance L

チップで各々約5.9cm, 7.8cmと平板より大きい誤差を生じた。これらの値は測定距離内ではほぼ一定であるため、以後の測定ではこの値によって補正した値を測定値とした。

3.1.3 粉面傾斜角

粉面の傾斜角度と反射波強度の相関を持めた。結果をFig. 9に示す。実験では被測定体は固定し、センサーを粉面上の同一地点を中心に回転移動させ超音波入射角を変化させた。砂を用い、距離 $L=50\text{cm}$ から超音波が粉面に垂直 ($\theta=0^\circ$) に入射する場合の測定強度を基準とした。粉面に対する超音波入射角度が大きくなるにつれて強度は低下し、傾斜 3° 以上では反射波は得られなかった。

上述した強度測定の場合と同様の条件で粉面傾斜角度と計測距離の関係性を求めた。Fig. 10は実距離と測定距離の誤差を示している。粉面傾斜角度が大きくなるにつれて反射波の強度が低下し、このため受信信号がスレッショールドレベルに達する時間が長くなる傾向を示している。

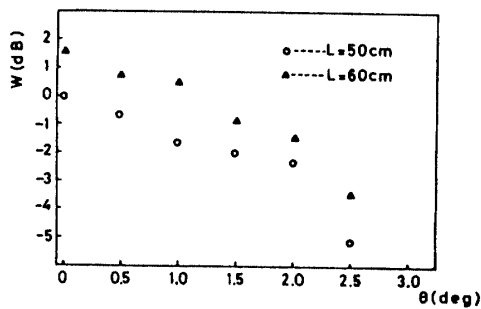


Fig. 9 Relationship between the inclination angle of the granular surface θ and the strength of the reflected wave W

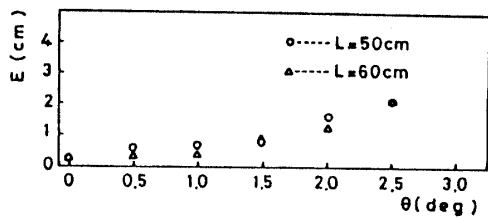
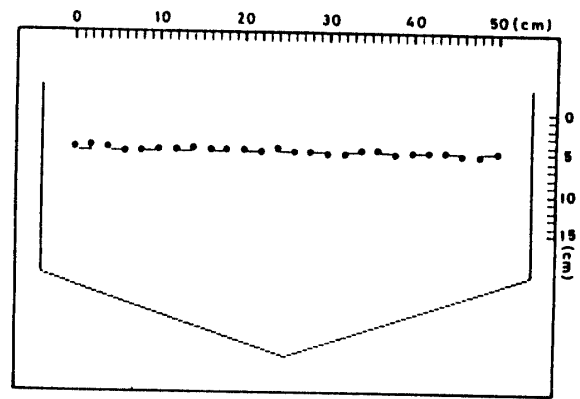


Fig. 10 Measurement error E for the granular surface with inclination angle θ

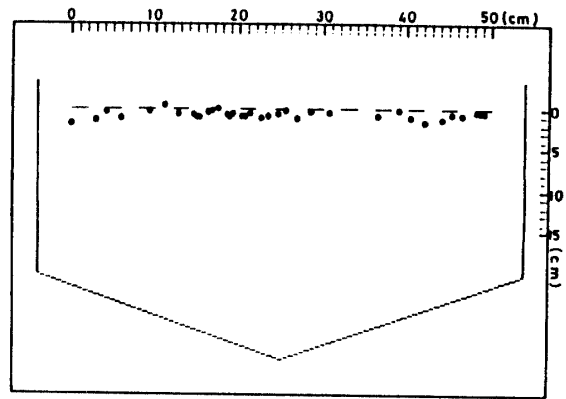
3.2 貯槽内粉面形状の計測

3.2.1 平面

貯槽内の粉体を計測した結果をFig. 11に示す。測定



(a) Sand



(b) Nylonchip

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

では粉面上部に置いたセンサーを水平方向に2cm間隔で移動して停止させ、左右に 2° のステップで首振り運動をおこなわせながら計測した。測定では誤差の大きい点をデータから除外したが、その方法としては(1)反射波強度がある閾値以下となる点を削除する方法、および(2)粉体の安息角を考慮して隣接する測定点相互の位置関係が不自然であると判断されるものを除外する方法を用いた。実線が実際の粉面、黒点が測定結果を表わしている。(1)の方法ではデータ棄却の閾値を砂の場合 -4dB 、ナイロンチップで -13dB とした。粒径が大きいと表面乱反射のため測定精度が劣化するが、前回の結果と比較して計測は改善されたといえる。

3.2.2 曲面

曲面を有する粉面について測定した。粉面に傾斜のある場合、角度によっては反射波が受信できず測定不能になることが多く、パターンの一部にデータの欠如

した部分を生じる。このため今回はセンサーに首振り運動をおこなわせて粉面に対する超音波の入射角度を小さくし、反射波を受信できない点を減少させることを試みた。さらにこの方法はセンサーを停止したまま進行方向および逆方向に複数の点を測定することが可能なため、水平移動ステップ数を減少させることが出来る。

曲面にたいしては粉面パターンを次の3通りの方法で推定し、比較した。

- (1)測定された全データ点を直線で結ぶ。
- (2)反射波はセンサーが粉面に対して垂直な位置にある時にかぎり得られるものとして、センサーの振れの角度から面の傾斜を推定する。
- (3)隣接する3個のデータから近似直線を求め、これを合成して粉面パターンを推定する。

Fig. 12に砂(粉面の平均傾斜角は約 12°)に対する結果を示す。Fig. 12(a)の実線は実際の粉面、黒点は測定点を示す。Fig. 12(b), (c), (d)中の下方の曲線は実際の粉面を表わし、上方の曲線はそれぞれ推定方法(1), (2), (3)によって求められたパターンを示している。3種類

の方法による結果にはいずれも大きな差は認められない。Fig. 13は砂で平均傾斜角を 27° とした場合である。センサーの首を振らせることによって得られたデータがあるため測定点の間隔が不均一となっているが、粉面の全体にわたってパターンが得られた。この場合にも3種類の推定法を用いた結果はほぼ同じであったため(b)に直線近似((1)の方法)の場合のみを示している。Fig. 14はナイロンチップで傾斜の緩やかな場合(平均傾斜角約 12°)である。粒径が大きいために乱反射によって反射波強度が低下し、データのばらつきが大きくなるが、平均化をはかることによって実パターンに近い状態が再現されている。また砂の場合と同様に推定法による顕著な差異は認められなかった。Fig. 15はナイロンチップの傾斜の大きい場合(平均傾斜度約 27°)である。受信波強度の低下と傾斜角の増大とによって検出不能となった点が多くなっているが、個々の点の測定は実パターンを比較的精度良く表わしている。

傾斜角度がさらに大きく、中央に大きいくぼみを持つ場合についてFig. 16, およびFig. 17に結果を示した。このようなパターンは粉体が貯槽より排出される

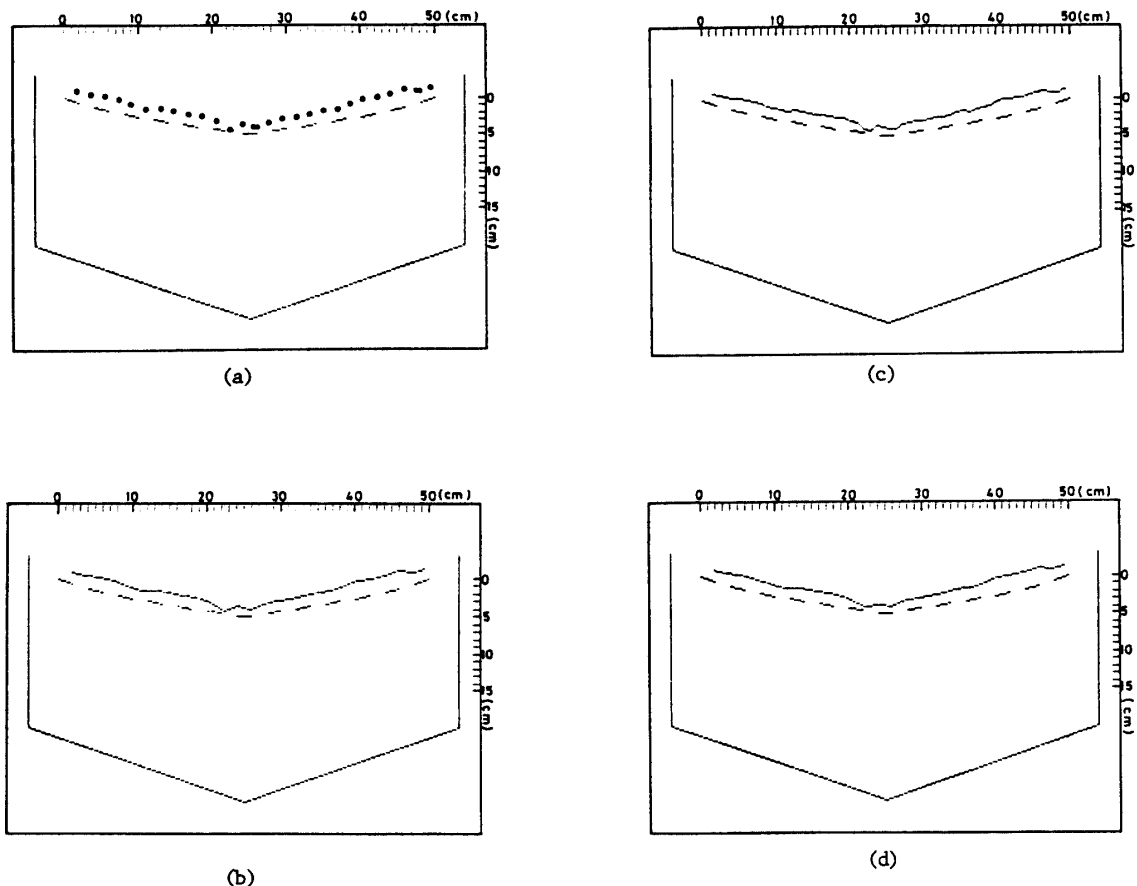


Fig. 12 Measurement for sand in a hopper (1)

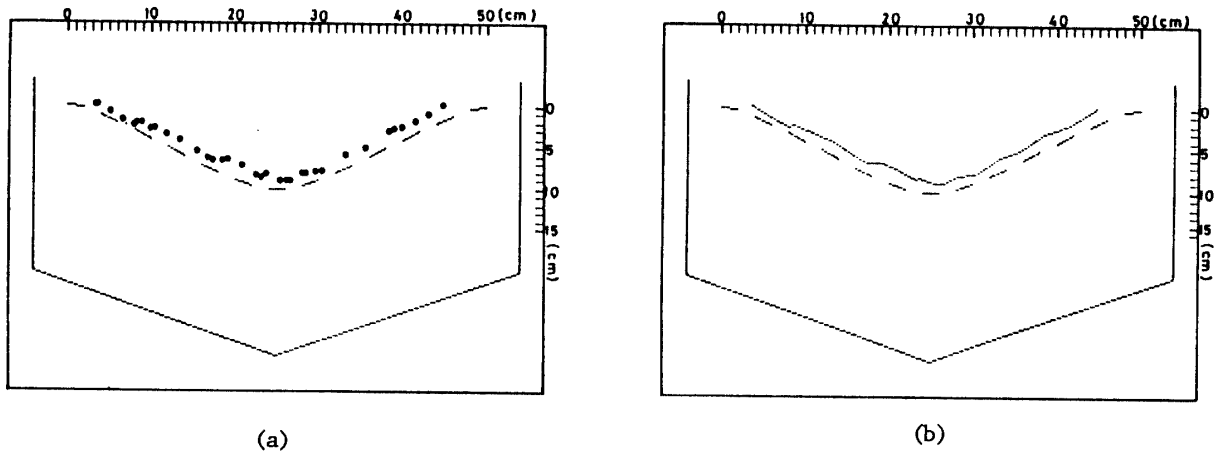


Fig. 13 Measurement for sand in a hopper (2)

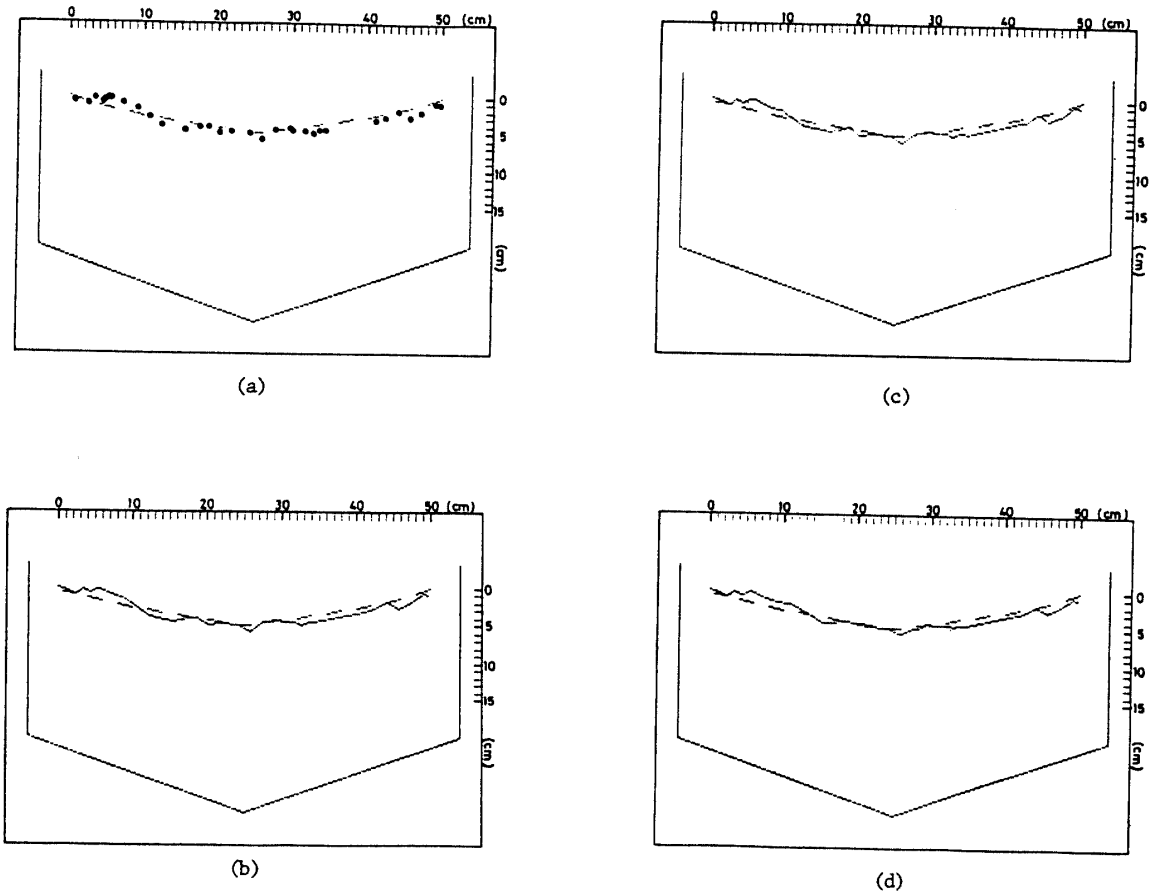
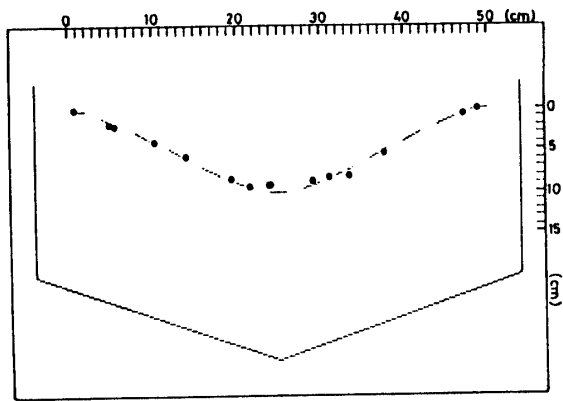
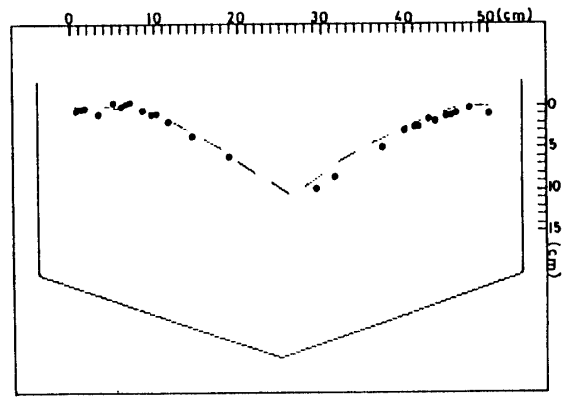


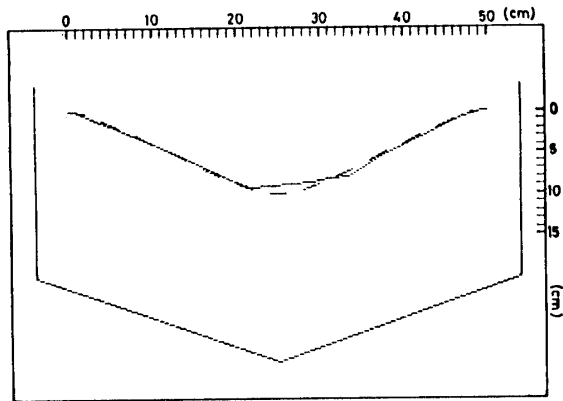
Fig. 14 Measurement for nylonchip in a hopper (1)



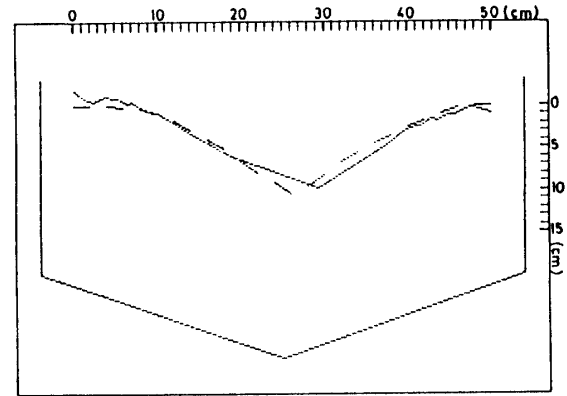
(a)



(a)



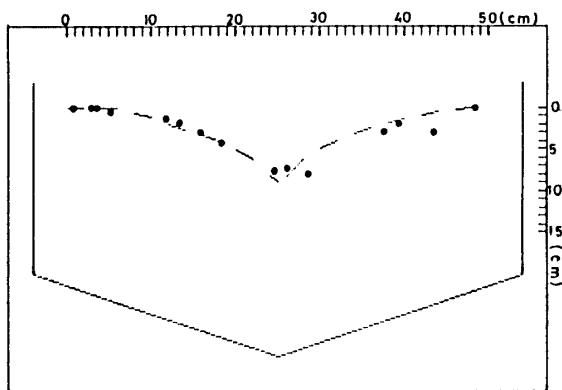
(b)



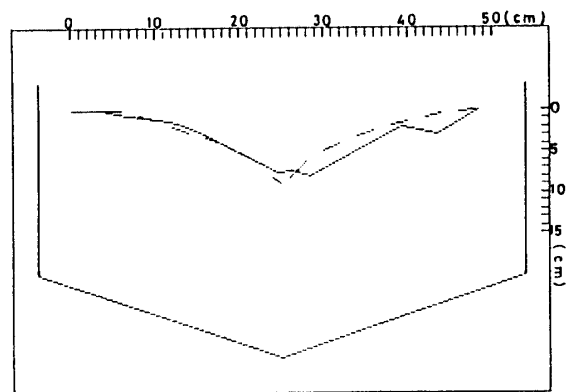
(b)

Fig. 15 Measurement for nylonchip in a hopper (2)

Fig. 16 Measurement for sand in a hopper (3)



(a)



(b)

Fig. 17 Measurement for nylonchip in a hopper (3)

際に生じるものを想定している。砂の場合中央凹部両側に傾斜の大部分があり(約37°)この部分での測定がうまく行なわれていない。ただし、数点についてはデータが得られているため、補間によって全体のパターンを描くことは可能であった。ナイロンチップについても同様に中央部付近の傾斜の大きい部分(約40°~48°)については測定精度が劣化し、今後改善すべき問題である。

4. 結 言

結果を以下に要約する。

- (1)狭指向性のセンサーを用いることによって計測点以外での反射を低減し測定精度が向上した。
- (2)センサーに振りを与えることにより傾斜面に対する測定を可能にし、連続した粉面パターンを得ることが出来た。
- (3)カウンター回路による時間計測によって距離測定精度を改善した。

- (4)反射波強度により信号がスレッショールドレベルに達する時間が異なり測定精度に影響する。したがって、被測定体によって出力信号が可変であることが好ましい。

最後に、本研究の実験を担当してくれた当時4年の上土井靖、中洞信一両君に深く感謝いたします。

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) 森元映治, 早野延男：山口大学工学部研究報告, 36, 1 (1985)
- 4) 堀江喜一, 他6名：National Technical Report, 28, 2 (1982)
- 5) 高山良一, 他3名：電子通信学会研究会資料, US82-28 (1982)

(昭和62年10月15日受理)