

超音波リニア・アレイセンサによる貯槽内粉面形状の計測

森元 映治*・糸井 茂*・早野 延男*

Measurement of Granular Surface Profile in a Hopper by Ultrasonic Linear Array Sensor

Eiji MORIMOTO, Shigeru ITOI and Nobuo HAYANO

Abstract

Ultrasonic linear array sensor with a resonance frequency of 40 kHz was applied to measure the two dimensional granular surface profile in the plane of the vertical section in a hopper. The phase delay compensation beam forming algorithm was adopted for the data processing. The profile was depicted by detecting the incident angle of the reflection from the surface and its travel time. The effect of the instrument configurations, such as the number of array, the distance between the receivers, and the measurement distance, were studied experimentally. The effectiveness of the application was confirmed by the results for fundamental profiles generally formed in a storage.

1. 緒 言

貯槽内粉粒体上表面の2次元断面内の形状測定に対し、リニア・アレイ型超音波センサの適応性について検討した。本方式は1個の発信素子と直線状に配した複数個の受波素子から構成され、受信波の方向と送受に要する時間から反射点の位置を推定する。本装置は電氣的に駆動され機械的運動部を全く持たないため発塵・付着等をともなう環境での使用に対し極めて有利な方式である。データの処理には位相補償ビームフォーミング法^{2),3)}を用いた。この方法は低周波数でのサンプリングが可能で装置を簡略かつ廉価に実現できる。また貯槽内粉面に対しては形状の推定に粉体物性を考慮することでデータの補正が可能であり^{4),5)}、採用した処理方式の精度を補償し得ると考えられる。試作機には市販のカメラ用素子を用い、モデル貯槽内の砂を対象に、測定条件、装置条件を変えて実験的に検討した。

2. 測定原理

Fig.1のように等間隔 d で直線状に配置された N 個の受波素子に、平面波が θ で入射する。送信波および受信波をそれぞれ $s(t)$ 、 $r(t)$ とし次のように表わす。

$$s(t) = A \sin \omega t \quad (1)$$

$$r(t) = B \cos (\omega t + \phi) \quad (2)$$

いま、0番目の受波素子を基準にとれば、 n 番目の素子の受波時刻は $t_{n,d} = nd \sin (\theta / c)$ だけ遅れる。したがって時刻 t における各素子の受信信号は次のように書ける。

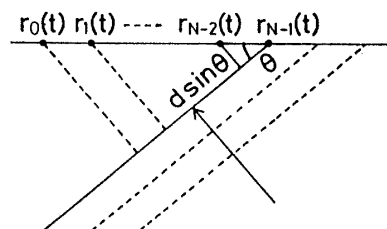


Fig. 1 Linear array

*生産機械工学科

$$\left. \begin{aligned}
 r_0(t) &= B\cos(\omega t + \phi) \\
 r_1(t) &= B\cos\left\{\omega\left(t - \frac{d\sin\theta}{c}\right) + \phi\right\} \\
 &\vdots \\
 r_n(t) &= B\cos\left\{\omega\left(t - n \cdot \frac{d\sin\theta}{c}\right) + \phi\right\} \\
 &\vdots \\
 r_{N-1}(t) &= B\cos\left\{\omega\left\{t - (N-1) \cdot \frac{d\sin\theta}{c}\right\} + \phi\right\}
 \end{aligned} \right\} (3)$$

超音波が送信された時刻から周期 $T_s = (2u+1)/4f$ で受信信号 $r(t)$ がサンプリングされるとし、各素子の受信信号の k 番目のサンプル値を $R(k) = r(kT_s)$ とすれば、その複素振幅は次式で与えられる。

$$R_{c,n}(k) = R_n(k) + j(-1)^{u+1}R_n(k+1) \quad (4)$$

これより受信信号のサンプル値は次のように表わすことができる。

$$\left. \begin{aligned}
 R_{c,0}(k) &= B\expj(\omega kT_s + \phi) \\
 R_{c,1}(k) &= B\expj\left\{\omega\left(kT_s - \frac{d\sin\theta}{c}\right) + \phi\right\} \\
 &\vdots \\
 R_{c,n}(k) &= B\expj\left\{\omega\left(kT_s - n \cdot \frac{d\sin\theta}{c}\right) + \phi\right\} \\
 &\vdots \\
 R_{c,N-1}(k) &= B\expj\left\{\omega\left\{kT_s - (N-1) \cdot \frac{d\sin\theta}{c}\right\} + \phi\right\}
 \end{aligned} \right\} (5)$$

ここに

$$B = \sqrt{\left\{R_n(k)\right\}^2 + \left\{R_n(k+1)\right\}^2} \quad (6)$$

(5)式より θ を求める。

n 番目の素子の受信波複素振幅は

$$\left. \begin{aligned}
 R_{c,n}(k) &= B\expj\left\{\omega\left(kT_s - n \cdot \frac{d\sin\theta}{c}\right) + \phi\right\} \\
 &= B\expj\alpha \\
 &= B\cos\alpha + jB\sin\alpha
 \end{aligned} \right\} (7)$$

ここに

$$\alpha = \omega\left(kT_s - n \cdot \frac{d\sin\theta}{c}\right) + \phi \quad (8)$$

(4)式と(7)式の比較より次式を得る。

$$B\cos\alpha = R_n(k), \quad B\sin\alpha = (-1)^{u+1}R_n(k+1) \quad (9)$$

これより

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{(-1)^{u+1}R_n(k+1)}{R_n(k)} + \varepsilon\pi \quad (10)$$

($\varepsilon = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

また $(n+1)$ 番目の受信波の振幅は

$$\left. \begin{aligned}
 R_{c,n+1}(k) &= B\expj\left\{\omega\left\{kT_s - (n+1) \cdot \frac{d\sin\theta}{c}\right\} + \phi\right\} \\
 &= B\expj\beta \\
 &= B\cos\beta + jB\sin\beta
 \end{aligned} \right\} (11)$$

ここに

$$\beta = \omega\left\{kT_s - (n+1) \cdot \frac{d\sin\theta}{c}\right\} + \phi \quad (12)$$

(11)式を書換えて、

$$R_{c,n+1}(k) = R_{n+1}(k) + j(-1)^{u+1}R_{n+1}(k+1) \quad (13)$$

(11)式、(13)式を比較すれば

$$B\cos\beta = R_{n+1}(k), \quad B\sin\beta = (-1)^{u+1}R_{n+1}(k+1) \quad (14)$$

したがって

$$\beta = \tan^{-1} \frac{(-1)^{u+1}R_{n+1}(k+1)}{R_{n+1}(k)} + \xi\pi \quad (15)$$

($\xi = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$)

さらに、 n 番目と $(n+1)$ 番目の受波素子の位相差を考えると、(10)式、(15)式より

$$\begin{aligned}
 \alpha - \beta &= \tan^{-1} \frac{(-1)^{u+1}R_n(k+1)}{R_n(k)} \\
 &\quad - \tan^{-1} \frac{(-1)^{u+1}R_{n+1}(k)}{R_{n+1}(k)} \\
 &\quad + (\varepsilon - \xi)\pi
 \end{aligned} \quad (16)$$

また、(8)式、(12)式より

$$\alpha - \beta = \omega \cdot \frac{d\sin\theta}{c} \quad (17)$$

ここで、 $0 \leq \theta \leq \pi/2$ より、 $0 \leq \sin\theta \leq 1$ 。いま $\eta = \varepsilon - \xi$ と置けば(16)式、(17)式より

$$\begin{aligned}
 \omega \cdot \frac{d\sin\theta}{c} &= \tan^{-1} \frac{(-1)^{u+1}R_n(k+1)}{R_n(k)} \\
 &\quad - \tan^{-1} \frac{(-1)^{u+1}R_{n+1}(k+1)}{R_{n+1}(k)} + \eta\pi
 \end{aligned} \quad (18)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left\{ \frac{c}{\omega d} \left[\tan^{-1} \frac{(-1)^{u+1}R_n(k+1)}{R_n(k)} - \tan^{-1} \frac{(-1)^{u+1}R_{n+1}(k+1)}{R_{n+1}(k)} + \eta\pi \right] \right\} \quad (19)$$

したがって(19)式より位相差 θ を計算することができる。

Fig. 2 に 2 次元の粉面測定モデルを示す。送波点を原点 O 、任意の受波素子の位置を点 Q 、粉面上の測定点を $P(x, z)$ とする。三角形 OPQ に余弦定理を適用すれば反射点 P は次のように表わされる。

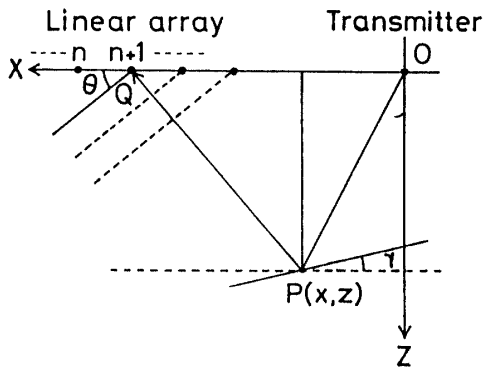


Fig. 2 Geometry for the measurement

$$\begin{aligned}
 P(x, z) &= P(\overline{OQ} - \cos(\frac{\pi}{2} - \theta), \overline{PQ} \sin(\frac{\pi}{2} - \theta)) \\
 &= P \left(\frac{2\overline{OQ} - (\overline{OQ}^2 + L^2) \sin \theta}{2L - 2\overline{OQ} \sin \theta}, \right. \\
 &\quad \left. \frac{(L^2 - \overline{OQ}) \cos \theta}{2L - 2\overline{OQ} \sin \theta} \right)
 \end{aligned}
 \tag{28}$$

ここに

$$L = \overline{OP} + \overline{PQ}$$

3. 実験装置および方法

使用した送波素子、受波素子の外形を Fig. 3, Fig. 4 に示す。送波用にコンデンサ型素子、受波用にセラミクス型素子を用いた。駆動周波数は40kHzである。送波および受波各素子は音圧半減角がそれぞれ9.32°, 2.0°, 第1サイドローブが22.0°, 60.0°の広指向特性を持つ。また超音波の空中での減衰を測定した結果、音圧を与える近似関数として $P = P_0 \exp(-\alpha L)$, $\alpha = 0.709 \text{m}^{-1}$ を得た。

装置の構成を Fig. 5 に示す。貯槽の上方にトランスデューサ部が置かれている。送波素子と受波素子の間隔は任意に設定でき、またアレイを構成する受波各素子相互の間隔も可変となっている。測定およびデータ処理はマイコンによりおこなった。

使用した材料は平均粒径 $317 \mu\text{m}$ の砂である。貯槽は横幅約860mmの対象型を用いた。

測定手順を以下に示す。またこれらをフローチャート化して Fig. 6 に示した。

- (1) 最大サンプリング回数 S_n (最大測定距離に相当) を設定する。
- (2) 超音波を送信する。
- (3) 送信波を A/D 変換する。

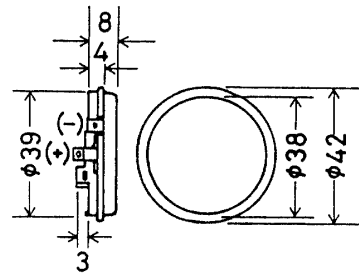


Fig. 3 Ultrasonic transmitter

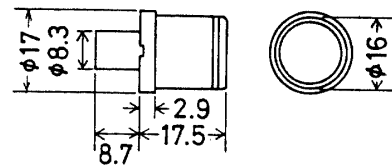


Fig. 4 Ultrasonic receiver

- (4) データをメモリに書き込む
- (5) 全受波素子についてデータの書き込みが終了したか？
 - 終了：つぎのステップへ
 - 未了：ステップ(3)へ
- (6) 全てのサンプリングについてデータの書き込みが終了したか？
 - 終了：つぎのステップへ
 - 未了：ステップ(3)へ
- (7) データをディスクにセーブする。
- (8) 測定終了。

4. 粉面形状の測定

測定では送波素子を固定し、リニア・アレイとの間隔 a を 10cm, 20cm, 30cm と変えた。また受波アレイの個数 N を 2 個, 4 個, 6 個とした。受信信号のサンプリング周期 T_s は $N=2$ のとき $u=5$, $T_s=68.75 \mu\text{sec}$, $N=4$; $u=9$, $T_s=118.75 \mu\text{sec}$, $N=6$; $u=13$, $T_s=168.75 \mu\text{sec}$ である。センサと粉面の距離は 2 m 程度とし超音波の指向性および送波時間を十分カバーするようにしてデータをとった。実測では超音波を送信した直後から受信波のサンプリングを開始できないこと、および全ての受波アレイで同時にサンプリングができないことから、得られたデータの位相を計算上で補正処理した。

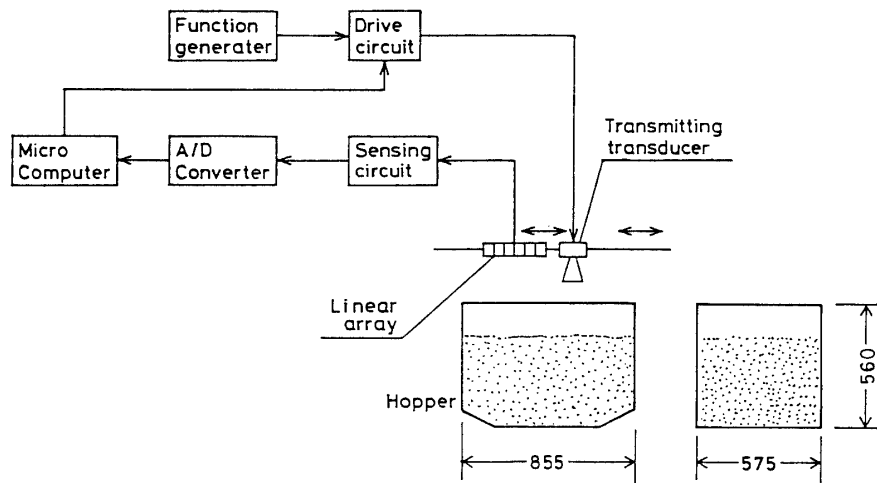


Fig. 5 Configuration of the apparatus

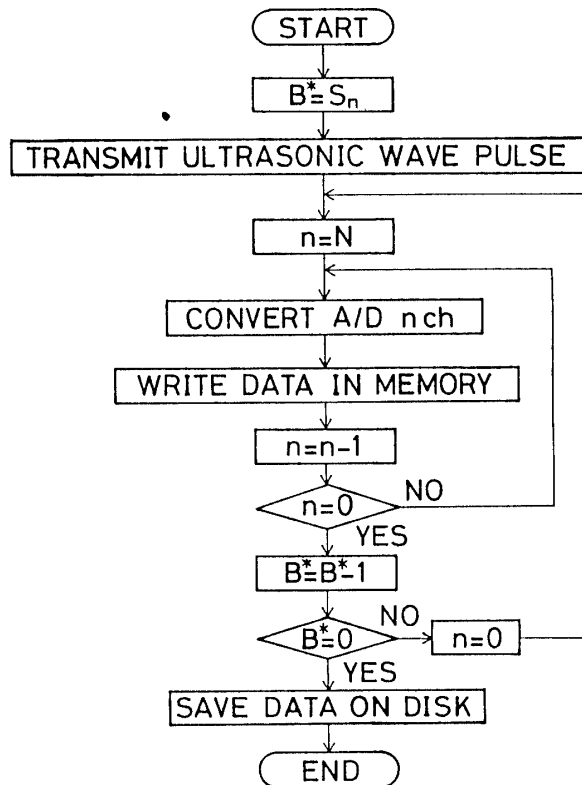
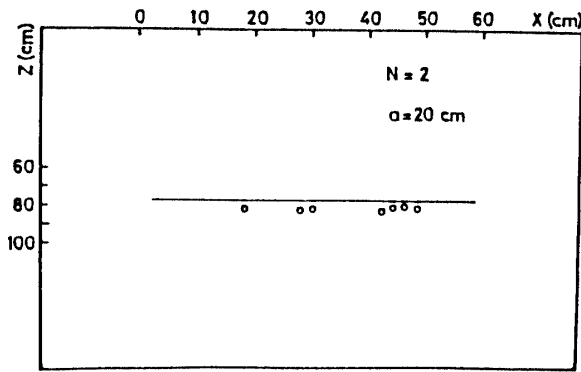


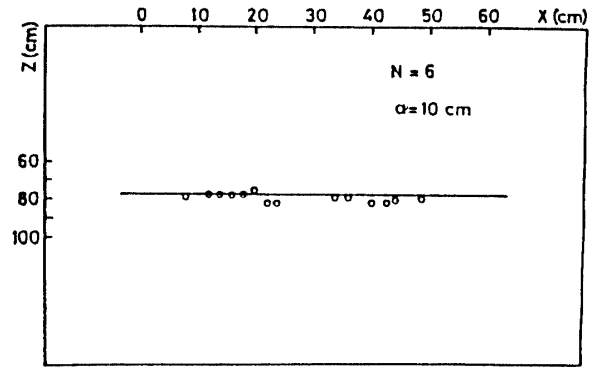
Fig. 6 Flow chart of the measurement procedure

平面に対する測定結果を Fig. 7, Fig. 8 に示す。図中実線は貯槽上部基準位置から重錘を吊し測定した実粉面で、精度は0.5mm 以内である。白丸が超音波による計測値で、得られたデータを 2 cm 間隔で平均化したものである。送波素子とリニアアレイ間の距離 $a=10\text{cm}$ としてアレイ個数 N を増すとき測定精度は向上し、 $a=20\text{cm}$ の場合についても同様の傾向を示した。しかし、

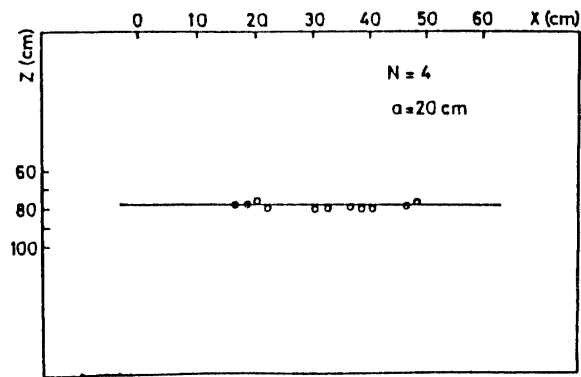
$a=30\text{cm}$ の場合、粉面中央部分でデータの消失がみられた。この原因としては超音波送信時間が 1 msec (40 波長に相当) と長いので貯槽内に定在波を生じその干渉の影響を受けたものと考えられる。 $a=40\text{cm}$ のとき $N=2, 4$ でデータの消失がみられたが、 $N=6$ のときは測定精度が劣化したもののデータの消失はみられなかった。これは a がある値以上になると定在波の影響



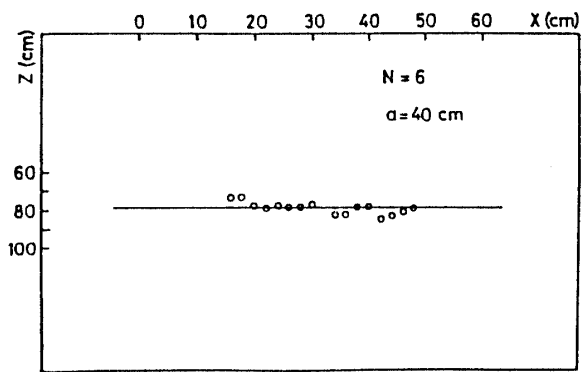
(a)



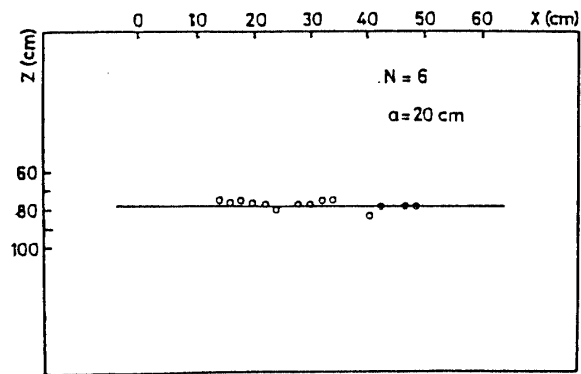
(a)



(b)



(b)



(c)

Fig. 7 Results for the flat surfaces (1)

が低減されサイドローブを含んだ部分で計測されたためと推測される。したがって a が小さく、 N が大きいほど測定精度は向上すると考えられるが、データの処理時間が長くなることを加味すればアレイ素子数 N を必要以上に多くすることは必ずしも有利ではない。

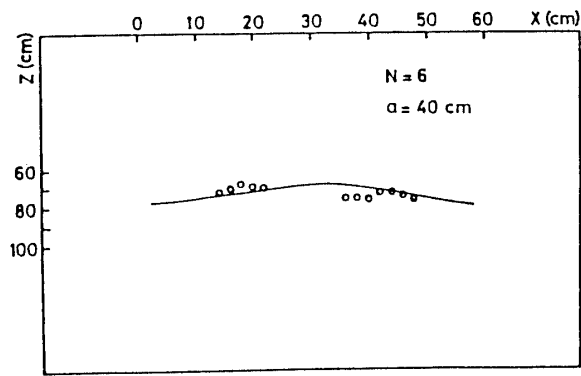
曲面に対する結果は Fig. 9 に示すように起伏のあるほど測定精度が劣化した。実粉面に対し凸面で測定誤差率は最大22%、平均11%を示し、また凹面に対しては最大21%、平均7%となった。また凸面ではおもに中央部より送波素子からはなれた領域での測定精度が

Fig. 8 Results for the flat surfaces (2)

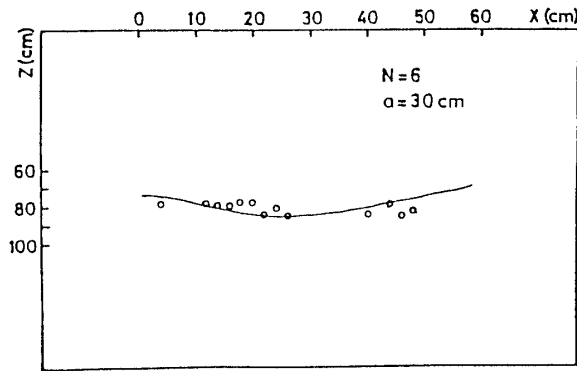
劣化し、凹面では逆に送波素子に近い領域で精度の低下がみられた。この原因としても超音波の干渉および粉面上での乱反射の影響が考えられる。

5. 結 言

貯槽内粉粒体上表面の2次元断面形状を測定する超音波リニア・アレイセンサを試作し、データの処理に位相補償ビームフォーミング法を適用した。砂を使用して基本的粉面形状について実測した結果、その概形を推定することができた。またアレイ素子間隔 d 、アレイ素子数 N 、送受波素子間隔 a の効果についても検討した。これより a が小さく N が大なるほど測定精度が向上することがわかった。 N については計測時間との面から最適値が存在することを示した。しかし、定在波の影響や粉面での乱反射の影響のため、曲面については測定誤差が大きく十分な結果を得られず、今後装置改善の必要性があると考えられる。



(a)



(b)

Fig. 9 Results for the surfaces with undulation

なお本実験の遂行にあたっては廣兼潤二君の協力を得た。ここに謝意を表す。

主な記号

- A : 送信波振幅
- a : 送信・受信素子間隔
- B : 受信波振幅

- c : 音速
- d : アレイ素子間隔
- f : 周波数
- L : 距離
- N : アレイ素子数
- P : 音圧
- R(k) : 受信波サンプル値
- r(t) : 受信波
- S_n : 最大サンプリング回数
- s(t) : 送信波
- T_s : サンプリング周期
- t : 時間
- u : 非負整数
- α : 空中での減衰率
- ε : 整数
- ξ : 整数
- η = ε - ξ
- θ : 超音波入射角
- φ : 初期位相
- ω : 角周波数

参考文献

- 1) A.Mocovski, Proc. of IEEE, 67, 4, Apr. (1979)
- 2) R.M.Mucci, IEEE Trans. on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ASSP-32, 3, Jun. (1984)
- 3) T.Horiguchi, NEC Res. & Develop., 88, Jan. (1988)
- 4) 森元映治他2名: 山口大学工学部研究報告, 39, 1 (1988)
- 5) 森元映治他2名: 計測自動制御学会論文集, 25, 6 (1989)

(平成元年4月15日受理)