

曲げ感知フレキシブル基板を用いた フレキシブルアレイプローブの曲率計測

田中雄介 平野大輔 岩田典朗 小倉幸夫

ジャパンプローブ株式会社 〒232-0033 神奈川県横浜市南区中村町 1-1-14

E-mail: {yuusuke.tanaka, d-hirano, iwata, ogura}@jp-probe.com

あらまし 凹面や凸面など曲面から計測可能なフレキシブルアレイプローブは画像表示で計測面の曲面が反映されていない課題がある。そこで曲率に応じた電圧を出力する曲げ感知フレキシブル基板を用いてリアルタイムでプローブの曲率を計測した。曲げ感知フレキシブル基板を張り付けたプローブを凹面、凸面の曲面ブロックで曲率計測し、センサの曲率と出力電圧が反比例の関係となった。曲率が小さいほど出力電圧が高く、凹面と凸面で出力電圧の極性が逆になり出力電圧を調べることで計測面の曲率を推定できることを示した。また、位置誤差は深さにより変化するが、深さ 5[mm]の位置では誤差が最大 0.56[mm]となった。

キーワード 超音波、フレキシブルアレイプローブ、曲率計測、曲げ感知フレキシブル基板、薄型センサ

Curvature Measurement of Flexible Array Probe Using Sheet Type Sensor for Bending

Yuusuke TANAKA Daisuke HIRANO Yoshiaki IWATA Yukio OGURA

Japan Probe Co., Ltd., 1-1-14 Nakamura-chou, Minami-ku, Yokohama-shi, Kanagawa, 232-0033, Japan

E-mail: {yuusuke.tanaka, d-hirano, iwata, ogura}@jp-probe.com

Abstract Flexible array probes that can measure from curved surfaces such as concave and convex surfaces have the problem that the curved surface of the measurement surface is not reflected in the image display. Therefore, the curvature of the probe was measured in real time using a bending-sensing flexible substrate that outputs a voltage according to the curvature. The curvature of the probe to which the bending-sensitive flexible substrate was attached was measured with concave and convex curved blocks, and the curvature of the sensor and the output voltage became inversely proportional. It was shown that the smaller the curvature, the higher the output voltage, and the polarities of the output voltage are opposite on the concave and convex surfaces, and the curvature of the measurement surface can be estimated by examining the output voltage. The position error changes depending on the depth, but the maximum error is 0.56 [mm] at the depth of 5 [mm].

Keywords Ultrasonic, Flexible array probe, Curvature measurement, Bending sensor flexible printed circuit, Thin film sensor

1. はじめに

構造物を破壊せずに内部の状態を検査する非破壊検査は配管や鋼板部材、橋梁の検査など様々な場所で実施されている。その中で超音波検査は広く利用され、非破壊検査だけでなく内蔵や胎児の計測など医用超音波でも使用されている。超音波の計測には超音波探触子が用いられるが、構造物が凸面や凹面の場合は超音波探触子を検査面に十分に接触させることができない。また、医用超音波では探触子を被験者に押し付けるが痛みを感じる場合がある。これらの課題に対応するた

めに柔軟性のある超音波探触子、ソフトプローブやフレキシブルアレイプローブ[1]を開発してきた。フレキシブルアレイプローブは B モード画像を表示できるが、多くの装置ではアレイプローブが直線、または一定の曲率であることが前提であり、形状が変化するフレキシブルアレイプローブの画像には対応できない。そこで我々は曲率に応じた電圧を出力する薄型シート状センサである曲げ感知フレキシブル基板を用いた曲率計測を試みた。今回、フレキシブルアレイプローブの曲率計測の基礎実験として凸面と凹面で曲率計測を行い、

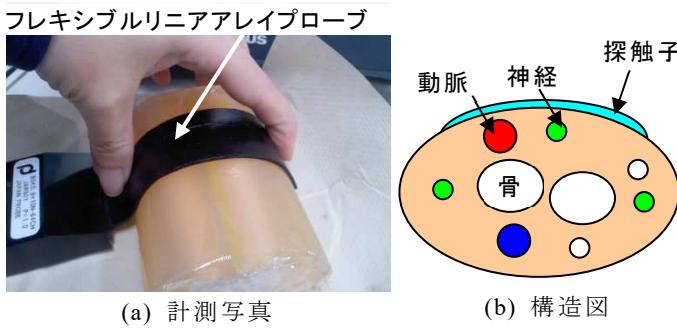


図 1 フレキシブルアレイプローブと手首ファントム

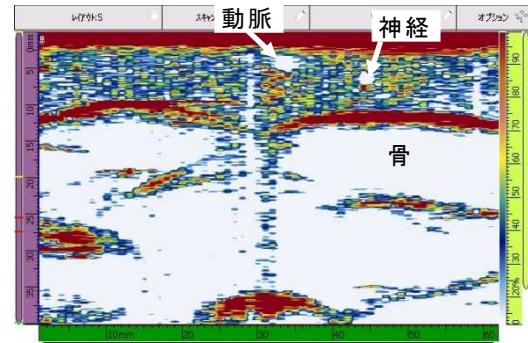


図 2 手首ファントムの B モード画像

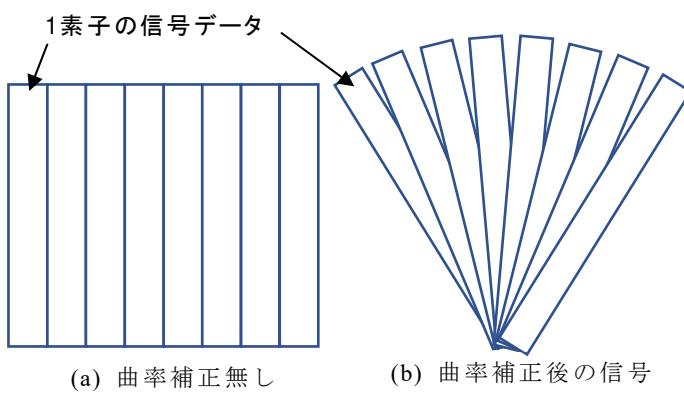


図 3 B モード画像における信号の並び

センサの曲率と出力電圧の関係を調べたことを報告する。また、画像化時の位置誤差について検討したことを報告する。

2. 曲率計測と取得画像

フレキシブルアレイプローブは変形させることで図 1 のように曲面でも超音波計測することが可能である。図 1 は手首ファントムを計測している様子でフレキシブルアレイプローブ直下にファントムの動脈、神経が配置されている。骨は超音波波が透過しない。ファントムを B モード画像化すると図 2 のようになる。動脈や神経が検出されているが、フレキシブルアレイプローブをファントムに巻き付けているため本来は扇状の画像となる。B モード画像は 1 素子ごとの時間軸信号データ(A モード)を並べたものであるが、通常のリニアアレイでは図 3(a)のように横に並べる。この状態では超音波探触子に曲率がある場合に対応できない。手首ファントムを巻き付けるように計測した場合は図 3(b)のように信号データを円弧上に補正する必要がある。コーンケーブ型探触子やコンベックス型探触子では曲率が既知であるため画像の補正が可能であるが、フレキシブルアレイプローブでは計測面に応じて画像を補正する必要がある。

そこで薄型シート状センサ(日本メクトロン製、曲げ

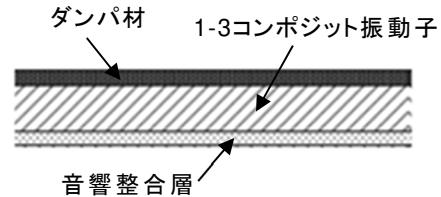


図 4 フレキシブルアレイプローブ構造図

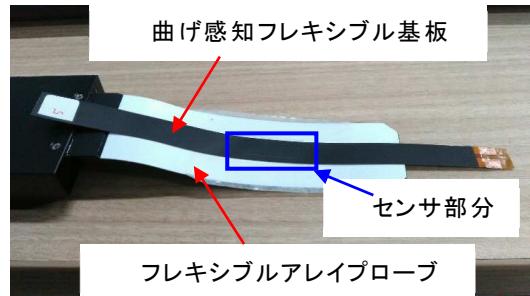


図 5 曲げ感知フレキシブル基板貼付図

感知フレキシブル基板)により曲率計測を行う。曲げ感知フレキシブル基板はセンサ部分を曲げることで直流電圧が発生する。この曲げ感知フレキシブル基板をフレキシブルアレイプローブへ搭載するが、この時に柔軟性を損なわないようにする必要がある。フレキシブルアレイプローブは図 4 のように音響整合層、PZT-エポキシ 1-3 コンポジット振動子、背面ダンパ材の 3 層構造である。このうち音響整合層と 1-3 コンポジット振動子は柔軟性があるが伸縮性が低く、ダンパ材は伸縮性がある。曲げ感知フレキシブル基板は伸縮性が低いため背面ダンパ材に貼り付けると、プローブの柔軟性が損なわれる。従って整合層側に曲げ感知フレキシブル基板を張り付ける必要がある。

3. フレキシブルアレイプローブの曲率計測

3.1 実験方法

フレキシブルアレイプローブ(64 素子、1[mm]ピッチ)と同構造の模擬サンプルを用いて図 5 のように曲げ感知フレキシブル基板を前面整合層に両面テープ

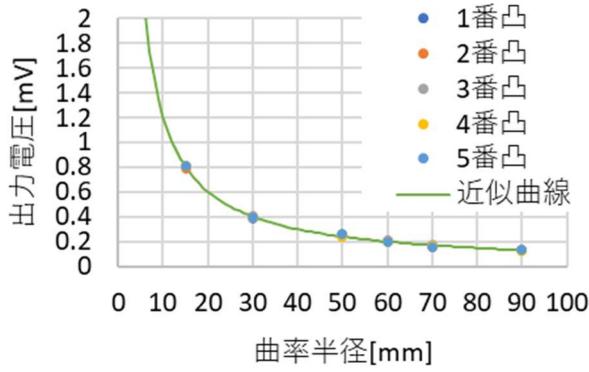


図 6 凸面ブロックの曲率半径と出力電圧

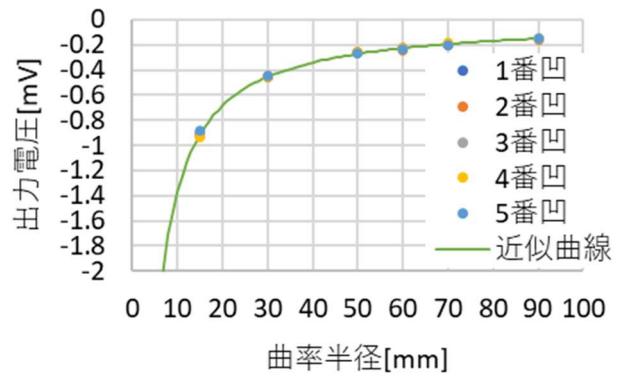


図 7 凹面ブロックの曲率半径と出力電圧

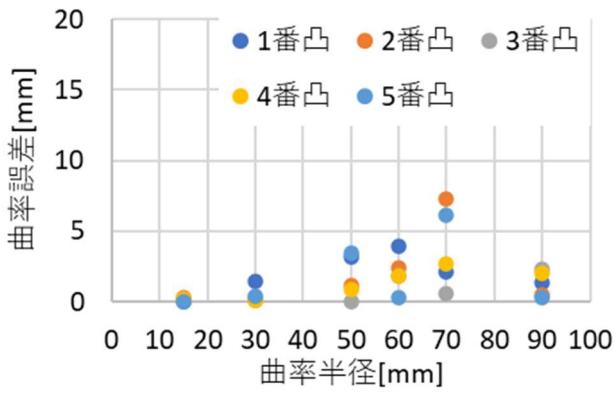


図 8 凸面計測時の曲率半径と誤差

で貼り付けた。曲げ感知フレキシブル基板センサ部分は 13[mm]×3[mm]で曲げ感知フレキシブル基板中央部に配置してある。曲げ感知フレキシブル基板の出力はデータロガー(キーエンス、NR-500)で計測した。曲率計測は凹面と凸面のアクリルブロックを用い、曲率半径は R15[mm]、R30[mm]、R50[mm]、R60[mm]、R70[mm]、R90[mm]の 6 種で評価した。曲げ感知フレキシブル基板は 5 枚測定し、1 番から 5 番まで番号を付けそれぞれの出力電圧の平均値から出力電圧と曲率の関係を調べた。

3.2 曲率計測結果

曲げ感知フレキシブル基板の曲率半径と出力電圧の関係について図 6 に凸面、図 7 に凹面の計測結果を示す。凸面と凹面の両方で曲率半径と出力電圧の関係が反比例になった。曲げ感知フレキシブル基板の出力電圧 V と曲率半径 R の関係は 1 から 5 番の出力平均から計算すると凸面が

$$V = \frac{12.158}{R} - 0.0051 \quad (1)$$

となり、凹面が

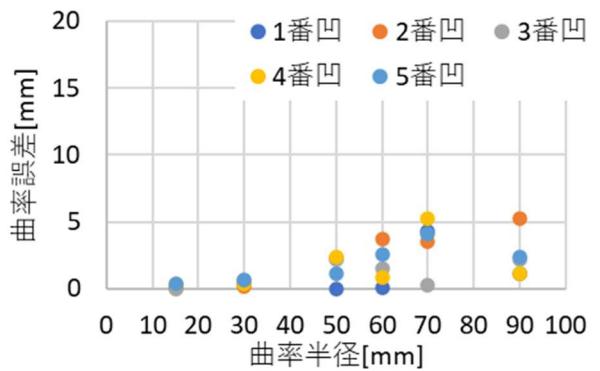


図 9 凹面計測時の曲率半径と誤差

$$V = \frac{-13.701}{R} + 0.0024 \quad (2)$$

となった。凸面の出力結果を式(1)、凹面の出力結果を式(2)に代入して R15[mm]から R90[mm]における曲率半径の誤差を計算すると凸面が図 8、凹面が図 9 となった。凸面では R15[mm]で曲率誤差が 0.03-0.33[mm]、R70[mm]で 0.63-7.26[mm]となった。凹面では R15[mm]で曲率誤差が 0.02-0.41[mm]、R70[mm]で曲率誤差が 0.30-5.23[mm]となった。曲率半径が小さいと曲率誤差も小さく R15[mm]で最大 2.7%であるが、R70[mm]では最大 10.4%だった。曲率半径が大きい場合は曲率誤差が大きくなるが、問題になるのは画像化したときの画素の位置誤差である。次に位置誤差について評価する。

3.3 誤差評価

フレキシブルアレイプローブで曲率計測は B モード画像を曲面に合わせて補正することである。曲率計測の誤差が画像上でどのような誤差になるかを検討した。凸面でフレキシブルアレイプローブを計測したときの画像は図 10 の扇形となる。ここで曲率半径が大きい図 10(a)と曲率半径が小さい場合の図 10(b)を考える。ある深さ d の画素を P 、 P' として、想定する曲率半径が図 10(a)の R 、実際に計測される曲率半径が図

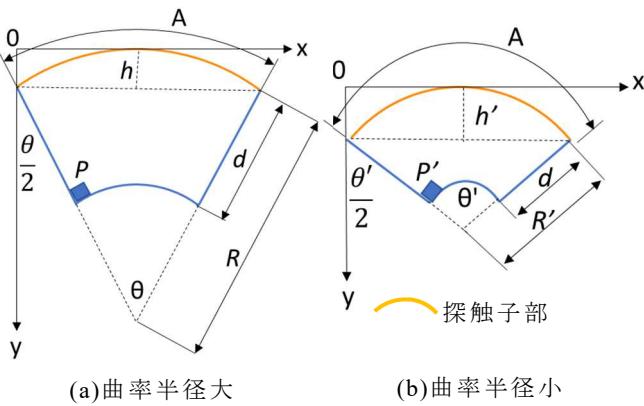


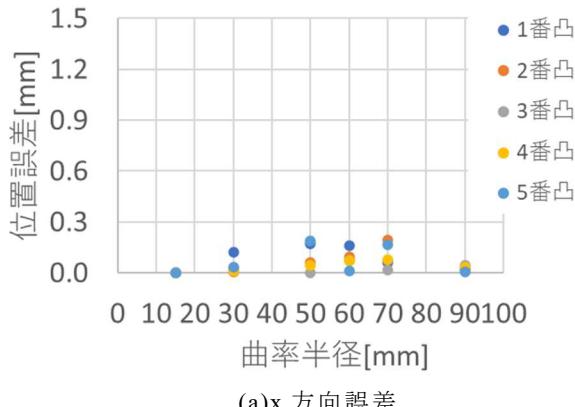
図 10 凸面計測時の画素位置変化

10(b)の R' とする。座標の基準点は x が振動子左端、 y が凸面の頭頂部とした。 P の x 方向と y 方向の位置は

$$P_x = d \sin \frac{\theta}{2} \quad (3)$$

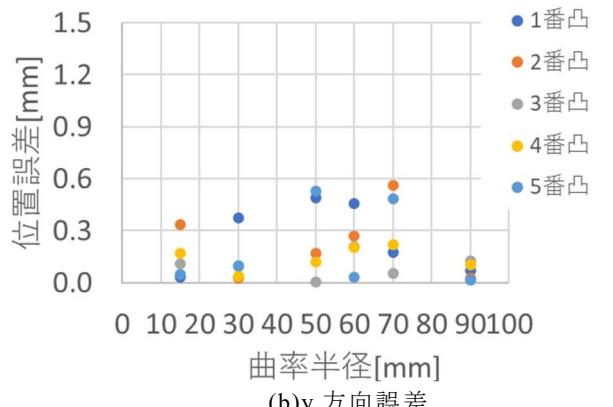
$$P_y = d \cos \frac{\theta}{2} + h \quad (4)$$

ここで θ は中心角、 R は計測された曲率半径、 A が振動子部の弧、 h が矢高である。ただし、 $d > h$ の場合である。 P_x と P_y は実際の画素位置での X 座標と Y 座標

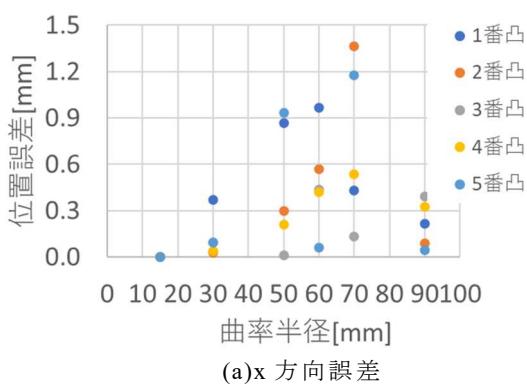


(a)x 方向誤差

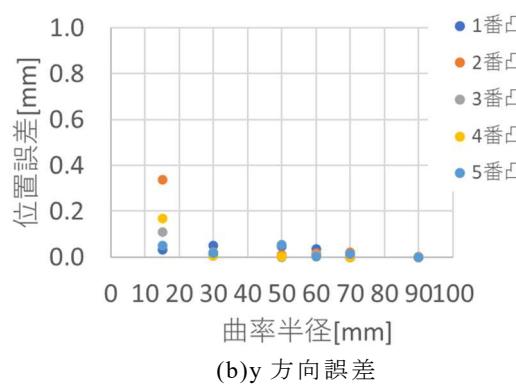
図 11 凸面計測時の深さ 5[mm]における画素の位置誤差



(b)y 方向誤差



(a)x 方向誤差



(b)y 方向誤差

図 12 凸面計測時の曲率半径の半分の深さにおける画素の位置誤差

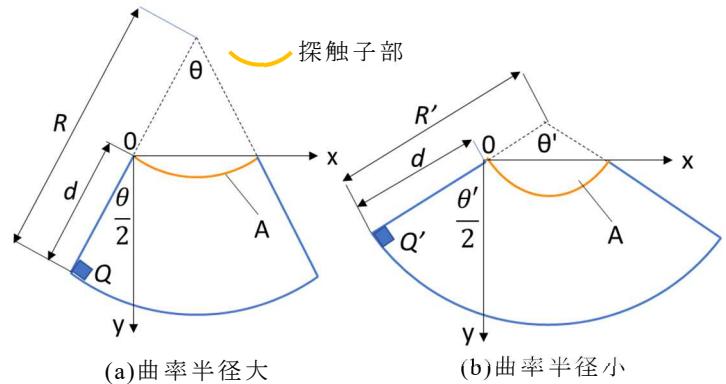
る。ただし、中心角 180° 以上では x 方向の誤差が無くなる。図 8、図 9 の曲率計測結果から画素位置の誤差を x と y について深さ 5[mm]の条件で計算した結果を図 11 に示す。 x 方向の位置誤差は最大 0.19[mm]、 y 方向の位置誤差は最大 0.56[mm]となった。曲率半径より深い位置の誤差は計算できなかったため、曲率半径の半分の位置(深さ 7.5~45[mm])での誤差をそれぞれの曲率で計算すると図 12 になる。 x 方向の最大位置誤差は 1.36[mm]、 y 方向の最大位置誤差は 0.34[mm]となった。

次に凹面で計測したときの誤差を考える。凸面と同様に図 13 のように一定の深さ d における画素 Q 、 Q' を考えると位置誤差 $e_x: Q'_x - Q_x$ 、 $e_y: Q'_y - Q_y$ はそれぞれ

$$e_x = Q'_x - Q_x = d \left(\sin \frac{\theta'}{2} - \sin \frac{\theta}{2} \right) \quad (9)$$

$$e_y = Q'_y - Q_y = d \left(\cos \frac{\theta'}{2} - \cos \frac{\theta}{2} \right) \quad (10)$$

となる。凸面と同様に深さ 5[mm]における位置誤差を図 14 に示す。 x 方向の最大位置誤差は 0.15[mm]、 y 方向の最大位置誤差は 0.10[mm]となった。曲率半径の半

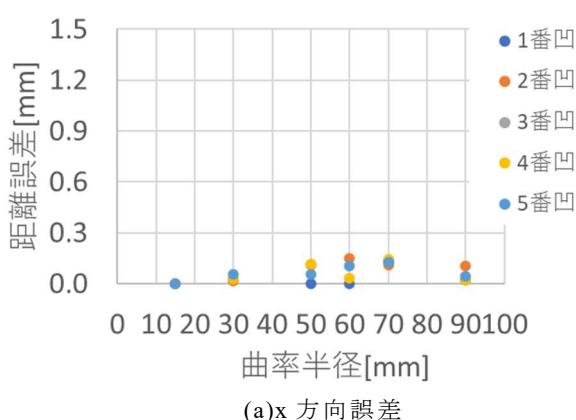


(a)曲率半径大 (b)曲率半径小

図 13 凹面計測時の画素位置変化

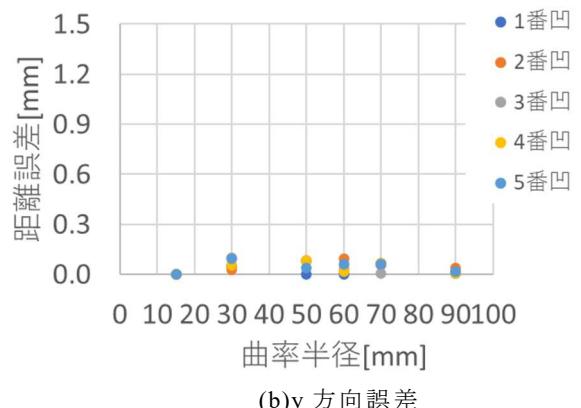
分の位置(深さ 7.5~45[mm])での誤差を図 15 に示す。 x 方向の最大位置誤差は 1.0[mm]、 y 方向の最大位置誤差は 0.55[mm]となった。曲率半径が小さい場合は曲率誤差が小さく、曲率半径が大きい場合は曲率誤差が大きくて位置誤差が計算上小さくなる。凸面、凹面の位置誤差は最大 1.36[mm]という計算結果になった。これらの誤差が問題になるかは今後検討を行う。

今後は計測された曲率に応じた画像の補正、実際のフレキシブルアレイプローブに搭載するときの設計、曲げ感知フレキシブル基板を複数搭載したときの曲

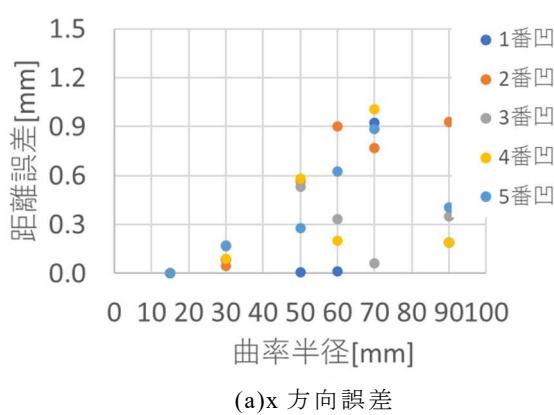


(a)x 方向誤差

図 14 凹面計測時の深さ 5[mm]における画素の位置誤差

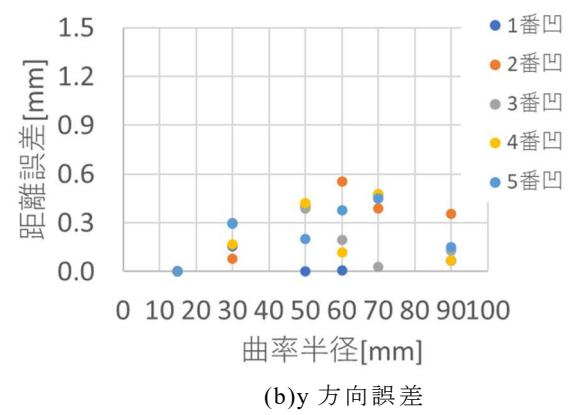


(b)y 方向誤差



(a)x 方向誤差

図 15 凹面計測時の曲率半径の半分の深さにおける画素の位置誤差



(b)y 方向誤差

面形状推定について検討を行う。

4. おわりに

フレキシブルアレイプローブの曲率計測を曲げ感知フレキシブル基板により試みた。曲率と曲げ感知フレキシブル基板の出力電圧の関係は反比例となった。

謝辞

日本メクトロン株式会社の吉田様には曲げ感知フレキシブル基板を貸していただきました。お礼申し上げます。

文献

- [1] 田中雄介、吉田光良、星野秀和、伊津美隆、小倉幸夫、“柔軟性超音波探触子による曲面からの画像化、”電子情報通信学会技術研究報告(超音波)、US2018-20(2018-06)、pp.1-6(2018)