

柔軟性超音波探触子による曲面からの画像化

田中雄介、吉田光良、星野秀和、伊津美隆、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, ohashi, ogura}@jp-probe.com

あらまし 柔軟性超音波探触子を開発し、曲面から試験体を計測した。ソフトプローブ、フレキシブルリニアアレイプローブ、フレキシブルマトリクスアレイプローブの3種で溶接部やパイプエルボの欠陥と減肉の計測、ファントムの画像化を行った。ソフトプローブでは溶接部やエルボの厚さ計測で波形取得、リニアアレイプローブでは溶接部やファントムのBモード画像取得、マトリクスアレイプローブではパイプエルボ減肉のBモード画像やCモード画像の複数断面の画像を取得した。また、医用超音波への応用として歯肉の厚さ計測、手首ファントムの画像化を行った。

キーワード 超音波、探触子、柔軟、曲面計測、アレイプローブ

Imaging from curved surface using flexible ultrasonic probe

Yuusuke TANAKA Mitsuyoshi YOSHIDA Hidekazu HOSHINO Ryu IZUMI Yukio OGURA

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

E-mail: {yuusuke.tanaka, ohashi, ogura}@jp-probe.com

Abstract A flexible ultrasonic probe was developed and the specimen was measured from the curved surface. Three types of soft probes, flexible linear array probes, and flexible matrix array probes were used to measure defects and thinning of welds and pipe elbows, and image of phantoms. Waveform acquisition by welding part and elbow thickness measurement with soft probe, B-mode image acquisition of welding part and phantom for linear ray probe, image of multiple section of B-mode image and C-mode image of pipe elbow thinning with matrix array probe I got it. In addition, we applied gingival thickness measurement and wrist phantom imaging as an application to medical ultrasound.

Keywords Ultrasonic, Probe, Flexible, Curved surface measurement, Array Probe

1. はじめに

超音波による計測は医用超音波、非破壊検査において広く利用されている。超音波は超音波探触子を検査対象に接触させて計測するが、探触子の形状は固定で変形しないので、凹凸面などの曲面に探触子接触を十分に接触させることが難しい。検査対象の形状に合わせた超音波探触子やスペーサを用いることで凹凸面でも計測が可能であるが、検査ごとに探触子やスペーサを変更することが理想ではあるが現実的でない。人体の計測では探触子を押し付けて計測するが、計測時に痛みが生じる問題がある。空中超音波や水浸法による計測があるが、空中超音波は波数が多く透過法による計測[1]や共振法による厚さ計測[2]が可能であるが、単発パルスによるパルスエコー法はまだ確立されていない。空中超音波でパルスエコーを行う振動子は研究されているが[3]、まだ実用化されていない。水浸法では電池などの計測は不可能、計測後に乾燥工程が必要と

いった問題がある。我々は探触子に柔軟性を持たせて曲面や凹凸面でも計測可能な柔軟性超音波探触子を開発し、それらの適用例などについて報告してきた[4]。今回、さらに柔軟性を高めた超音波振動子の開発と医用超音波への応用について述べる。

2. 柔軟性超音波探触子

2.1 ソフトプローブ

まずアレイではないソフトプローブについて述べる。構造は図1に示すようにダンパ、振動子、音響整合層の3層構造で、溶接部などの凹凸面でも探触子を直接接触させて計測することが可能である。振動子はPZT-エポキシの1-3コンポジットでダンパや音響整合層も柔軟性のあるものを用いている。形状は図1(a)に示すようなペン型と図2に示すフラット型がある。ペン型は図3のように振動子がペン先になっており、用途によってペン先の形状を変更することができる。

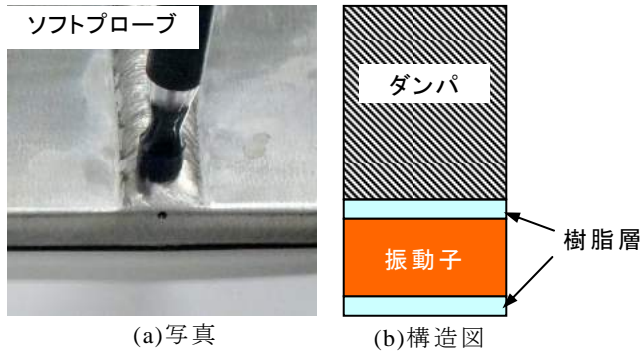


図1 ソフトプローブ

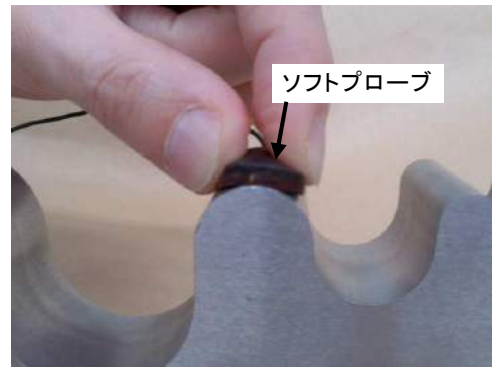


図2 フラット型ソフトプローブ



図3 ペン型ソフトプローブ



図4 高柔軟性プローブ



図5 指に巻いたリニアアレイプローブ



図6 フレキシブルマトリクスアレイプローブ



図7 球状部分計測

また、さらに高柔軟性プローブを図4に示す。振動子、ダンパの構造を改良して柔軟性を高めた。従来のソフトプローブでは検査対象が変形するものに対しては柔軟性を発揮しにくかったが、高柔軟性プローブでは指で押すと変形する程度の柔軟性で人体などの柔軟物体に対しても探触子を変形させて接触性を高めることが可能である。

ソフトプローブで取得できる情報は時間と振幅のAモードである。対象物の厚さ、内部欠陥の計測などが可能で、用途としてはこれまで斜角探傷で計測していた溶接部などの凹凸面からの垂直探傷、パイプなどの曲面における厚さ計測や垂直探傷が挙げられる。

2.2 フレキシブルリニアアレイプローブ

次にフレキシブルリニアアレイプローブについて

述べる。リニアアレイプローブは短冊状の振動子が並んでいる構造である。図5に示すように指に巻けるくらいの柔軟性があり、曲率半径は最小5[mm]までの曲面まで対応可能である。

フレキシブルリニアアレイプローブで取得できる情報は各振動子のAモード波形でそれらを組み合わせることで断面のBモード画像が取得できる。用途としては主に曲面からの超音波計測のほか、プローブの薄さを活かして狭い空間の計測に使用される。航空機の主翼やヘリコプターのローターなど曲面材の計測に使用する。人体では腕、足に巻きつけての計測や首の曲面に沿わせて頸静脈などの計測に適用可能である。

2.3 フレキシブルマトリクスアレイプローブ

最後にフレキシブルマトリクスアレイプローブに



図 8 ソフトプローブによる隅肉溶接部探傷

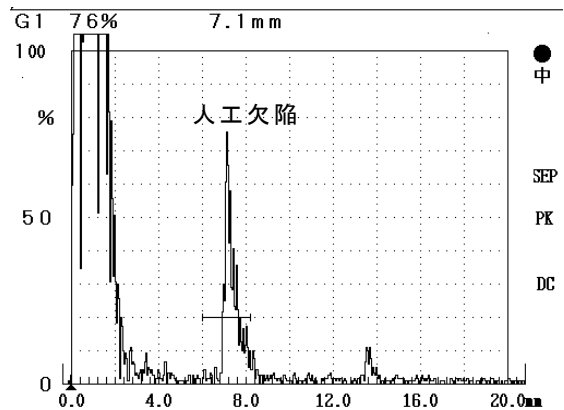


図 9 隅肉溶接部探傷波形



図 10 ソフトプローブによる
パイプエルボ部計測

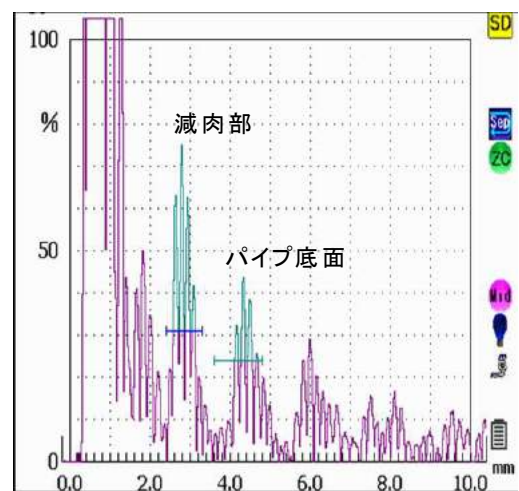


図 11 パイプエルボ探傷波形

ついて述べる。図 6 のように振動子が 2 次元に配置してあり、図 7 のように球面状の曲面から計測可能である。

フレキシブルマトリクスアレイプローブは各振動子の A モード波形を組み合わせることで複数断面の画像が取得できる。プローブの任意断面の B モード画像や水平断面の C モード画像が取得できる。パイプエルボ部減肉など 3 次元曲面において画像化を行うなどの応用が期待できる。

3. 曲面計測と画像化

3.1 隅肉溶接部の垂直探傷

曲面計測の例として隅肉溶接部の探傷を示す。ペン型ソフトプローブを用いて図 8 の隅肉溶接部を計測した。溶接部には人工欠陥として直径 1[mm]の横穴が配置されている。ソフトプローブを溶接部に直接接触させて計測したが、通常は平らな部分から斜角探触子により計測する。斜角探触子で計測する場合は入射点や屈折角の測定、エコー高さ区分線の作成など事前に準備が必要であるが、ソフトプローブによる測定は垂直

探傷のため上記の準備が省略できる。

図 9 にペン型ソフトプローブによる隅肉溶接部の探傷波形を示す。ソフトプローブは振動子直径 5[mm]、周波数 10[MHz]のものを用いた。探傷器は UI-27(菱電湘南エレクトロニクス製)を用いた。深さ 7.1[mm]の位置に人工欠陥からの反射波形が検出されており、隅肉溶接部を直接計測できていることがわかる。

3.2 小径パイプエルボの厚さ計測

次にソフトプローブによる小径パイプエルボの厚さ計測について述べる。パイプエルボ部は内部に流れる液体により壁面が削られて薄くなり、進行すると破断する。エルボ部は曲面のため通常の超音波探触子では十分に接触できないが、ソフトプローブでは接触が可能である。

図 10 に直径 15[mm]の铸铁パイプエルボをソフトプローブで観測した例を示す。エルボには人工減肉を設定した。ソフトプローブは振動子直径 3[mm]、周波数 10[MHz]のものを用いた。探傷器は UI-27(菱電湘南エレクトロニクス製)を用いた。エルボ部分に直接プローブを接触させて計測した。図 11 に計測結果を示す。健



図 12 フレキシブルリニアアレイプローブによるパイプ溶接部探傷



図 13 フレキシブルリニアアレイプローブによるパイプ溶接部断面画像

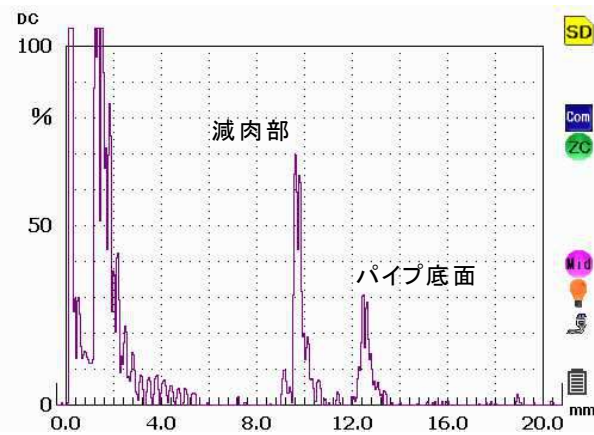
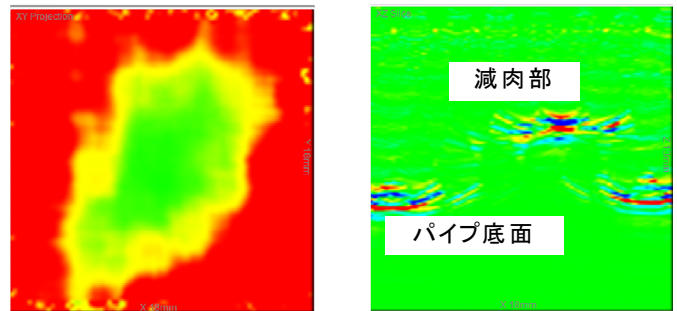


図 14 高柔軟性プローブによるパイプエルボ探傷波形



(a) 平面画像(Cモード) (b) 断面画像(Bモード)

図 15 パイプエルボ部減肉の平面画像と断面画像

全部が厚さ 4.1[mm]、減肉部が厚さ 2.5[mm]と計測された。この結果からソフトプローブを使ってパイプエルボ部から減肉を直接計測可能なのことがわかる。

3.3 パイプ溶接部の計測

次にフレキシブルリニアアレイプローブを使ったパイプ溶接部の計測について述べる。配管溶接部に図 12 のようにプローブを沿わせて計測し、Bモード画像を取得した。配管溶接部には人工欠陥として直径 1[mm]の横穴が配置されている。用いたプローブは素子数 64、周波数 10[MHz]、素子ピッチ 1[mm]のものである。探傷器は OMNISCAN(オリンパス製)を用いた。

図 13 に配管溶接部の Bモード画像を示す。人工欠陥と配管底面の信号が画像化されており、広範囲を一度に超音波で計測できていることがわかる。ソフトプローブでは広範囲は計測できないが狭い部分の計測が可能で、フレキシブルリニアアレイプローブは一度に広範囲が計測でき断面画像が取得できるという特徴がある。これらは計測環境、目的により使い分けることが重要である。

3.4 パイプエルボ減肉部の画像化

最後に高柔軟性プローブとフレキシブルマトリクスアレイプローブを用いたパイプエルボの計測について述べる。塩化ビニル製、呼び径 100[mm]、厚さ 10[mm]でエルボ内部に人工減肉を設定した。計測につ

いては図 7 のようにパイプエルボ部にプローブを直接接触させて計測した。

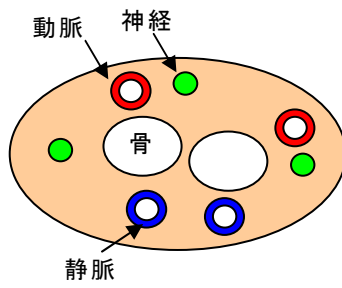
まず高柔軟性プローブでパイプエルボ部における波形を取得した。プローブ振動子の直径は 10[mm]、周波数は 5[MHz]で探傷器は UI-27(菱電湘南エレクトロニクス)を用いた。図 14 に探傷波形を示す。減肉部からの反射信号が 9.5[mm]、底面からの反射信号が 12.4[mm]の位置にあり減肉部の探傷波形が取得できた。

次にフレキシブルマトリクスアレイプローブでパイプエルボの人工減肉を画像化した。プローブは振動子が 8×8 の 64 素子でピッチ 2.5[mm]、周波数は 5[MHz]である。図 15 にパイプエルボ減肉の Bモード画像と Cモード画像を示す。Bモード画像で減肉深さ、Cモード画像で減肉形状をそれぞれ確認できた。

高柔軟性プローブ、フレキシブルマトリクスアレイプローブはそれぞれ球面の 3次元曲面で計測でき、高柔軟性プローブは Aモード波形、フレキシブルマトリクスアレイプローブは Bモード、Cモード画像をそれぞれ取得でき、組み合わせにより 3次元画像の構築が可能である。Aモードに比べて Bモードと Cモードの両方を取得する場合はシステムが複雑になるので用途に応じて使い分けることが必要となる。

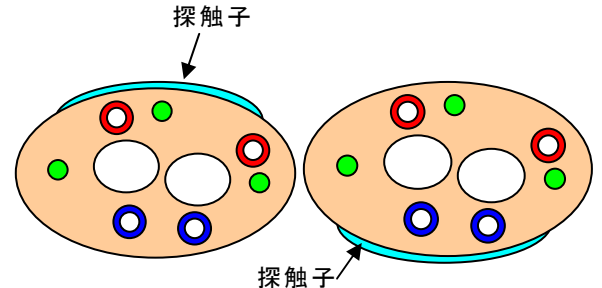


(a) 計測写真



(b) 構造図

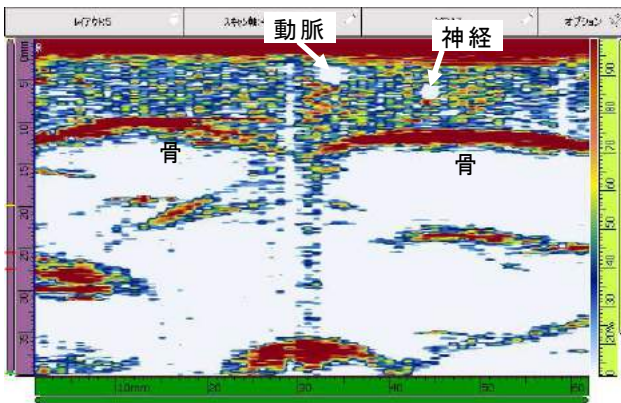
図 16 手首ファントム



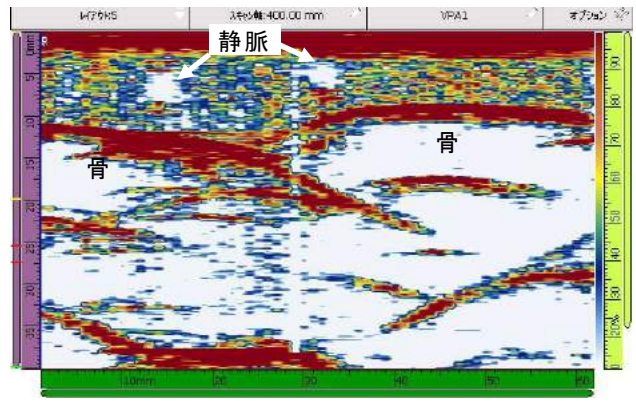
(a) 動脈側から計測

(b) 静脈側から計測

図 17 手首ファントムの計測



(a) 動脈側から計測



(b) 静脈側から計測

図 18 手首ファントムの計測結果

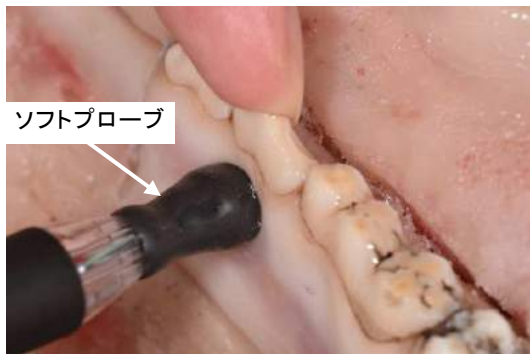


図 19 ソフトプローブによる歯肉の厚さ計測

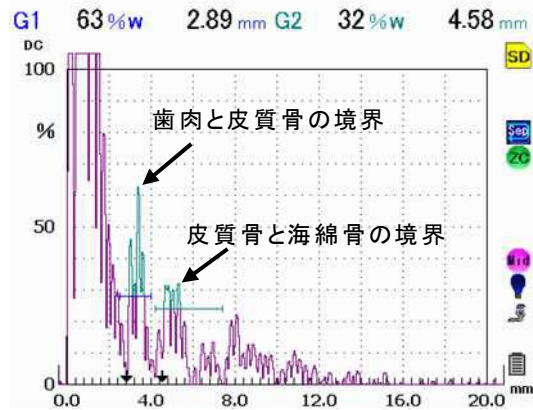


図 20 歯肉の計測波形

4. 医用超音波への応用

4.1 手首ファントムの計測

柔軟性超音波探触子の医用超音波への応用としてまずフレキシブルリニアアレイプローブによる計測について述べる。フレキシブルリニアアレイプローブは帯状のため、腕や足、お腹周りに沿わせて計測が可能である。手首ファントムを使って腕を計測したときにどのように画像化できるか確かめた。図 16 の欠陥や神経、骨が内部に配置された手首ファントムについてフレキシブルリニアアレイプローブで計測した。計

測は 5[MHz]、素子数 64、素子ピッチ 1[mm]のフレキシブルリニアアレイプローブを OMNISCAN(オリンパス製)で駆動して計測した。プローブは図 17 のように手首ファントムの動脈側と静脈側から計測した。図 18 に手首ファントムの B モード画像を示す。血管や神経は散乱が少ないので白抜き、骨は超音波が透過しないのでその下が白くなることから判断し、それぞれの箇所が計測できたことがわかる。

4.2 歯肉の厚さ計測

次にソフトプローブを用いて歯肉と皮質骨の厚さ

計測を行ったことについて述べる。図 19 のように歯肉にソフトプローブを接触させて計測し、反射信号から歯肉とその奥の皮質骨の厚さを計測した。試験体はブタの顎を用いた。用いたソフトプローブは振動子径 3[mm]、周波数 10[MHz]のペン型である。探傷器は UI-27(菱電湘南エレクトロニクス製)を用いた。図 20 に計測結果を示す。歯肉と皮質骨の境界からの反射信号で歯肉の厚さ、皮質骨と海綿骨の境界からの反射信号で皮質骨の厚さを計測する。歯肉と皮質骨では音速が異なるため、表示上の数値を補正して求める。今回は皮質骨を 4500[m/s]として設定しているため、歯肉の厚さは表示の 3 分の 1 として評価した。歯肉は 1.0[mm]、皮質骨は 1.7[mm]と評価した。

この結果より歯科へソフトプローブの適用が可能ということがわかる。今回は歯肉の外側から計測したが、ソフトプローブのペン先を L 字のものに変更することで歯肉の裏側からの計測も可能である。また、受信波形に変化があれば虫歯の判定も可能であると考えられる。

5. まとめ

ソフトプローブ、フレキシブルリニアアレイプローブ、フレキシブルマトリクスアレイプローブを開発し、凹凸面や曲面、球面からの超音波計測を行った。ソフトプローブは A モード波形、フレキシブルリニアアレイプローブは B モード画像、フレキシブルマトリクスアレイプローブは B モードと C モード画像がそれぞれ取得できる。ソフトプローブでは溶接部探傷やエルボ部の計測、歯肉の厚さ計測を行った。フレキシブルリニアアレイプローブは溶接部や手首ファントムを画像化した。フレキシブルマトリクスアレイプローブはエルボ減肉部の画像化を行った。

文献

- [1] 田中雄介、“非接触で探傷・計測が可能な超音波スキャナー技術、” 超音波 techno、Vol.28、No.5、pp.81-83(2016)
- [2] 田中雄介、大橋保宏、小倉幸夫 “空中超音波共振法による非接触厚さ計測、” 2018 年日本音響学会春季研究発表会講演論文集 3-10-9 pp.1021-1024(2018)
- [3] 辻俊宏、北原大太郎、田中康弘、小原良和、三原毅；空中超音波計測のためのダイシングした圧電素子を用いる気相複合探触子の開発；平成 29 年度日本非破壊検査協会秋季講演大会講演概要集；pp.3-4(2017)
- [4] 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超音波計測、”；日本超音波医学会基礎技術研究会資料 Vol. 2017 No.2 pp.1-8(2017)