

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：14701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K04409

研究課題名(和文) 符号化開口超音波探触子を用いた軟質チューブ内の高精度ドップラ流量計測に関する研究

研究課題名(英文) Study on High-Precision Doppler Flow Measurement in a Soft Tube Using an Encoded Aperture Ultrasonic Probe

研究代表者

村田 頼信 (MURATA, Yorinobu)

和歌山大学・システム工学部・教授

研究者番号：50283958

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：小径プラスチック製チューブ内の液体流速分布を測定するために、高分子圧電膜を用いてチューブの側面に直接設置可能な曲面開口を持つM系列符号化積層探触子の開発を行った。この探触子をパルスドップラ法と組み合わせることで、点物体の位置検出と移動速度が測定可能なことを実証した。一方で、同じく高分子圧電膜を用いたM系列符号化リニアアレイ探触子を開発し、管内を流れる気泡分布の可視化について検討を行った。チューブ断面の超音波撮像を想定して、円形撮像領域の円周に探触子を曲げて配置して点物体の撮像を行った。その結果、走査すること無しに、1回の送受信で円形領域内の対象物の撮像が可能であることを実証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

フレキシブルな開口を持った超音波探触子や空間選択性を有する超音波探触子を応用することで、これまで超音波計測が困難な対象にも適用を可能とするだけでなく、超音波撮像システムの高性能化をより簡便なシステムで実現できる可能性がある。本研究で、小径軟質チューブの流量計速を高精度に行うシステムの構築に向けて前進できた点や超音波計測システムの低コスト化をはかれる点では社会的意義があり、高分子圧電膜の特性をこれまでと違った方向から応用する研究は学術的にも意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order to measure liquid velocity distribution in a small-diameter plastic tube, we developed an M-sequence encoding stacked ultrasonic probe with a curved aperture that can be placed directly on the side of the tube using PVDF piezoelectric polymer films. By combining this probe with the pulsed Doppler method, we demonstrated that it is possible to detect the position and measure the moving velocity of a point object.

On the other hand, an M-sequence encoded linear array ultrasonic probe, using a polymer piezoelectric film, was also developed to visualize the distribution of bubbles in a fluid flowing in a tube. Assuming ultrasonic imaging a cross-section of a tube, the probe was bent and set around the circumference of a circular imaging area to image a point object. As a result, it was demonstrated that it is possible to image an object in the circular area with a single transmission/reception without scanning.

研究分野：超音波応用計測，非破壊検査

キーワード：超音波 流量計速 パルスドップラ 符号化開口 高分子圧電材料 超音波撮像

1. 研究開始当初の背景

近年、半導体製造分野や医療分野において、微小流量計測への需要が高まっている。一方で、食品分野でも、ビールサーバを代表とする飲料水の経時的な消費量をリアルタイムに把握して販売力向上を目指す動きも出てきている。このような需要から、正確な微小流量計測システムの開発が必要とされている。医療分野では、輸血や人工透析などに流量計を利用するために、内部流体に測定部が非接触な状態で、清潔に測定が可能な流量計が求められている。また、飲料水では炭酸ガスや果汁を含んだ流路でも正確な流量計測が切望されている。液体用の微小流量計としては、U字型超音波流量計や電磁流量計があり既に製品化もされている。しかし、いずれも既存の流路に直接設置することができず、特に小口径の軟質チューブにおける微小流量計測は困難である。そこで、これらの問題点をなくすものとして、我々はガイド波を用いたストレート型超音波流量計を考案し計測精度の向上を検討してきた。この手法は、円環状の超音波振動子をチューブに取り付け、液体が流れる上下方向の時間差で流量を測定する方法である。しかしながら、流体内に気泡が含まれると超音波が散乱・減衰して流量を計測できないという問題が見つかった。

2. 研究の目的

本研究では、上の問題を解決する方法の一つとして、流体を流れる気泡からのエコーを取得し、そのドップラ効果を利用した超音波パルスドップラ計測に着目した。パルスドップラ法は時間分解能を高くすることで、超音波の到来方向の流速成分が計測可能である。しかしながら、送受信角度の分解能に乏しく流速分布の計測は困難である。パルスドップラ法を微小流路(小口径軟質チューブ)に応用する場合、チューブ内に効率よく超音波を入射する必要がある。しかも、流量計測精度を高めるには、流速分布を計測する必要がある。通常の超音波探触子では、指向性が広く小口径軟質チューブ内の流速分布を測定することは困難である。一方で、パルスドップラ法は、伝搬時間作法と比較すると精度が落ちること、気泡の量が一定(100 ppm)程度必要であることなどの制約がある。このような混相流では相の空間分布を知ることでさらなる計測の精度向上が期待され、超音波や電磁波を用いたプロセストモグラフィ(PT)法で気液それぞれの体積分率を計測する方法などが提案されている。しかしながら、PT法は大量のアレイセンサの組み合わせを変えながら計測する必要があるため、装置が大型化・複雑化する。そこで、安価で簡便な方法で管内の気泡分布を知る手法が求められている。

そこで、これまで研究代表者が考案してきた符号化開口超音波探触子を応用することで、管内の流体中に気泡を含んだ場合においても高精度な流量計速を実現することを目的とした。なお、本研究期間では、目的達成に向けて以下の2つのアプローチで取り組むこととした。

- (1) 高分子符号化積層探触子を用いたパルスドップラ流速計の高精度化
- (2) 高分子符号化開口リニアアレイ探触子による管内を流れる気泡分布の可視化

3. 研究の方法

- (1) 高分子符号化積層探触子を用いたパルスドップラ流速計の高精度化

① 曲面開口を持つ7bit長M系列符号化積層探触子の作製

従来のパルスドップラ流速計の欠点である角度方向の分解能を改善するために、申請者らが考案した符号化積層探触子を適用した。外径が $\phi 10\text{mm}$ 以下のプラスチック製チューブに対応可能にするために、曲面開口を持つ7bit長M系列符号化積層探触子を新たに作製した。ここで、符号化積層探触子とは、圧電膜から発生する超音波の位相が圧電膜の残留分極方向に依存することを利用し、高分子圧電膜(PVDF膜)の残留分極方向を制御してM系列の符号順に積層し、かつそれぞれの圧電膜で発生した超音波が互いに重ならないように適切な厚みの遅延材を挟むことによって擬似的なM系列パルス列信号を発生させるものである。このような探触子を用いると、送受信方向に依存して各層での受信タイミングが異なるため、M系列などの直交関数で重み付けを行えば、送受信方向の識別が可能となる。今回、10MHzでの速度計測を想定し、圧電膜の厚みを約 $52\mu\text{m}$ 、遅延材(ポリイミド)の厚みを約 $175\mu\text{m}$ とし、7bit長のM系列の極性に応じた順序で圧電膜を7枚積層した。なお、振動子は $\phi 8\text{mm}$ のアクリルチューブの外壁に沿うような曲面形状とし、開口はチューブの軸(流れ)方向に広い指向性を持たせるために短冊形状($3\text{mm} \times 7\text{mm}$)とした。バックリング材には、振動子の曲率に応じた成形が容易なエポキシ樹脂を使用した。

② 符号化積層探触子を用いたパルスドップラ計測

パルスドップラ法で流体中を流れる気泡の位置と速度を計測する場合、ワンショット(1回の超音波の送受信)で気泡からのエコーを高SN比で取得する必要がある。そこで、研究期間中は常に得られた知見を元に符号化積層探触子の改良を図った。その上で、作製した符号化積層探触子を用いて、水中にて単一気泡の速度計測を試みた。具体的には、単一気泡が浮上する速度をパ

ルスドップラ法で計測を行った。符号化積層探触子を水槽内底部に固定し、単一の気泡を注射針で発生させ、浮力により上方に移動する気泡に向けて超音波を照射した。その時の反射波から気泡の位置を検出すると共に、一定の周期で連続して取得した反射波形からドップラ周波数を算出し、気泡の移動速度を求めた。なお、気泡の位置（音軸からの角度）は、あらかじめ送受信角度ごとに取得した複数の波形と気泡からの反射波との相関演算を行うことにより検出した。なお、送信波はパルス波であり、パルスの繰返し周期を 10 kHz とした。同時に、高速度カメラにより気泡の動きを撮影し、カメラにより求めた気泡の移動速度と比較した。

(2) 高分子符号化開口リニアアレイ探触子による管内を流れる気泡分布の可視化

① M系列符号化開口リニアアレイ探触子の開発および撮像方法の最適化

符号化開口による管内を流れる気泡分布の可視化について検討を行った。手法として、まずは柔軟性を有した高分子圧電膜 (P(VDF-TrFE)) を利用し、M系列によって波面を符号化することが可能かつ管壁に沿って巻きつける事ができるM系列符号化開口リニアアレイ探触子の作製方法を検討した。符号化積層開口とは異なり、直交関数で重み付けした素子を1枚の圧電膜に直線上に並べることで、送受信角度の検出を行おうというものである。このような探触子を持ちるとドップラ効果による速度検出はできないが、より広い領域について高分解能で超音波撮像を行える可能性がある。ここでは、図1に示すようにし状電極と図中破線部分の全面電極板とでP(VDF-TrFE)圧電膜を挟み込み、まず、図中の上部の電極のみを使って挟み込んだ圧電薄膜の厚み方向で上向き残留分極を持つ素子を形成し、次に、図中の下部の電極を使って同じく圧電薄膜の下向き残留分極を持つ素子を形成する分極処理法を用いた新たな探触子構成について検討した。その一方で、この探触子を適用した瞬時撮像シミュレーションを行い、提案手法の有効性とより鮮明な画像の取得方法について検討を行った。

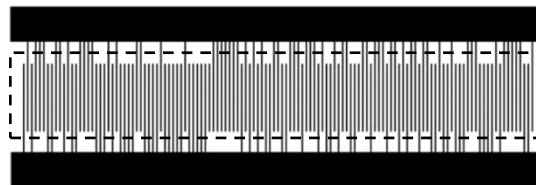


図1 63bit長M系列電極

② M系列符号化開口リニアアレイ探触子による円形領域の可視化

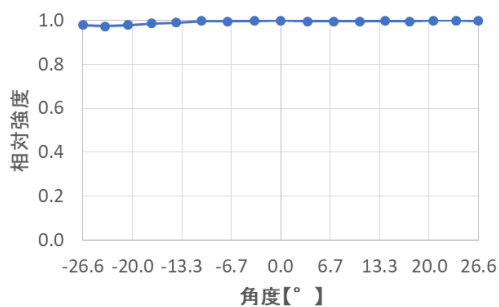
開発した 63bit 長のM系列符号化開口リニアアレイ探触子を円形撮像領域の半周に配置（図5(a)参照）して、水中において瞬時断面撮像を試みた。金属製点物体を撮像領域内に配置し、これをワンショットで超音波撮像を行った。画像化は、符号化積層開口による対象物の位置検出と同様、あらかじめ点対象物を撮像領域内で走査して画像伝達関数を取得し、この伝達関数と受信波の相関演算により行った。

4. 研究成果

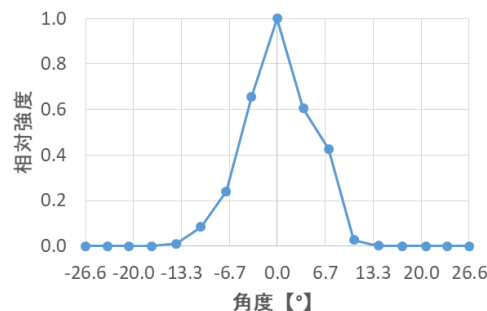
(1) 高分子符号化積層探触子を用いたパルスドップラ流速計の高精度化

① 曲面開口を持つ7bit長M系列符号化探触子の開発

作製した7bit長M系列符号化探触子の性能は空間選択性（受信波の角度依存性）を調べる事により評価した。探触子の音軸上に配置した点物体（φ0.5mm）からのエコーを取得し、これを規準として異なる送受信角で得られたエコーとの相互相関を計算することによって、送受信角による点広がり関数を求めた。結果として、図2に示すように、通常の単層探触子と比較して、単層探触子では実現困難な空間選択性を、開口面を曲面とした符号化積層開口において有することが確認された。一方で、開口を曲面とした場合、フラットな符号化積層開口に比べ、角度分解能が悪化することが確認された。また、探触子の指向性を更に広げること（無指向性化）や探



(a) 単層探触子



(b) M系列符号化積層探触子

図2 空間選択性の比較

触子の製作における組立精度の向上など、更なる最適化について検討が必要なことも明らかとなった。

② 符号化積層探触子を用いたパルスドップラ計測

開発した符号化積層探触子を用いて、水中にて単一気泡が浮上する速度をパルスドップラ法で計測することを試みた。図3に、40回送受信による相関値の推移波形とこの波形の周波数特性を示す。この結果から、ドップラシフト周波数が約2.2kHzであることがわかる。この値と気泡の検出角度から気泡の速度が求まり、結果として、気泡が存在する位置を瞬時に検出可能であることを示した。また、同時に計測した高速カメラによる結果に対し0.01m/sの誤差で速度計測も可能なことを実証した。しかしながら、気泡の位置検出における角度分解能が十分でなく実用への課題が残った。

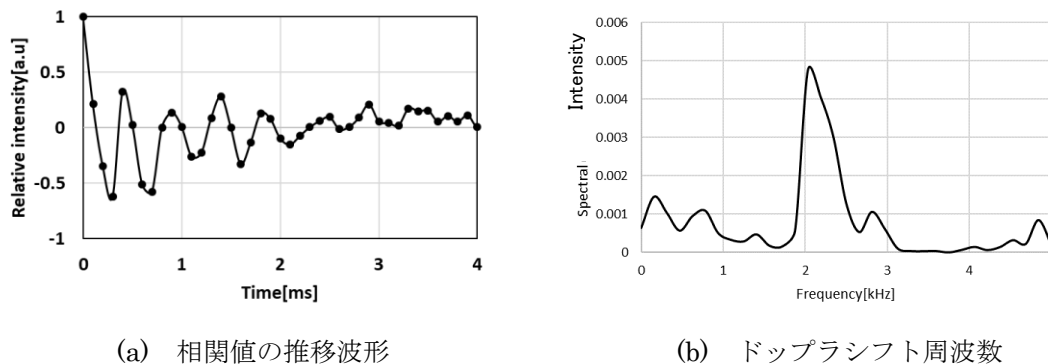


図3 単一気泡のパルスドップラ速度計測

(2) 高分子符号化開口リニアアレイ探触子による管内を流れる気泡分布の可視化

① 高分子符号化開口リニアアレイ探触子の開発および撮像方法の最適化

管内を流れる気泡を瞬時に撮像するために、高分子圧電膜 (P(VDF-TrFE)) を用いて、管壁に沿って巻きつける事が可能な 63bit 長のM系列符号化開口リニアアレイ探触子を作製した。ここで、新たな符号化アレイ探触子の構成方法を考案し、電極を物理的に分けずとも符号化開口が実現出来ることを確認した。その一方で、M系列符号化開口リニアアレイ探触子を適用した瞬時撮像シミュレーションを行い、提案手法の有効性とより鮮明な画像の取得方法について検証を行った。その結果、事前計測（つまり、撮像における画像伝達関数を取得する時）と同じ大きさかつ単体の撮像物体に関しては撮像が可能であるが、対象物の大きさの変化や複数物体の撮像に対してはノイズが大きく、物体の判別が困難になることが確認された。これを改善するため、取得信号に対し3値化処理を行った後に画像の再構成を行ったところ、ノイズが低減され、対象の大きさの変化による像の消失にも改善が見られることがわかった。また、これまでは送信時は単一の素子から超音波を送信してM系列符号化アレイ探触子で受信する二探触子法での撮像を検討してきたが、新たに符号化アレイ開口を受信時だけでなく送信時にも利用する一探触子法での撮像についても検討した。図4に、リニアアレイ探触子の素子配列方向の点広がり関数をシミュレートした結果を示す。この結果は、送受信角度の識別性能を表しており、結果として、二探触子法に比べ、一探触子法の方がダイナミックレンジが高く撮像結果のSN比が改善することを確認した。

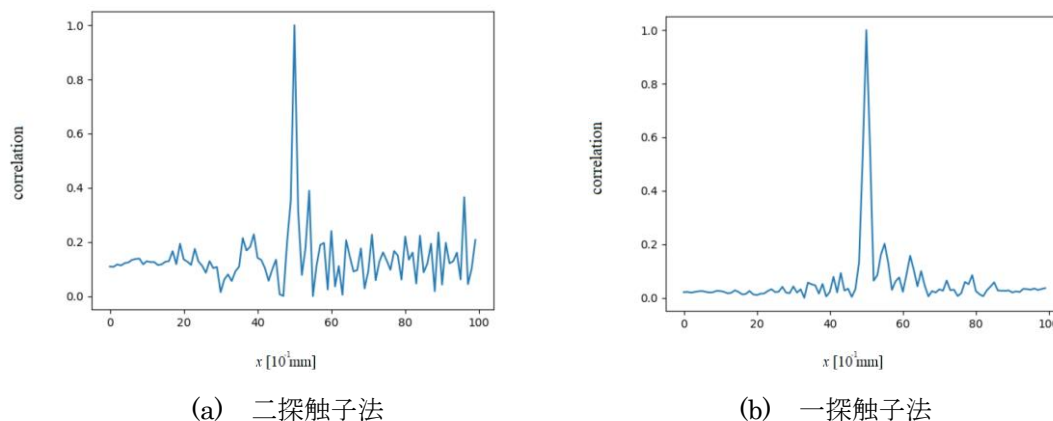
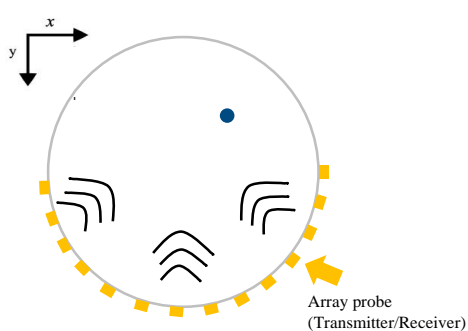


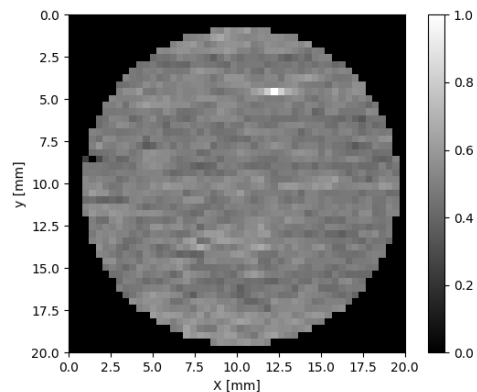
図4 リニアアレイ探触子の素子配列方向の点広がり関数

② M系列符号化開口リニアアレイ探触子による円形領域の可視化

図 5(a)に示すように、開発したM系列符号化開口リニアアレイ探触子を円形撮像領域の半周に設置して、水中において金属製点物体をワンショットで超音波断面撮像した結果を図 5(b)に示す。この図から、本提案手法によって、点物体の位置を正確かつ瞬時に検出できることを実証した。この結果は、管内の流体中を流れる気泡や異物に対しても位置検出が可能なことを示している。しかしながら、撮像結果のSN比は十分とはいえず、今後は圧縮センシングなどの技術を取り入れて画質を改善していきたいと考える。



(a) 探触子および点物体の配置



(b) 可視化像

図 5 M系列符号化開口リニアアレイ探触子による点物体の瞬時撮像

<引用文献>

- ① Y. Murata and D. Kaneda: Study on Pulse Compression Ultrasonic Imaging by a Stacked M-Sequence Encoding Probe, Electrical Engineering in Japan, Volume 207, Issue 1, pp. 36-42 (2019)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Murata Yorinobu, Kaneda Daiyu	4. 巻 207
2. 論文標題 Study on Pulse Compression Ultrasonic Imaging by a Stacked M Sequence Encoding Probe	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Electrical Engineering in Japan	6. 最初と最後の頁 36 ~ 42
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 山本一貴, 村田頼信
2. 発表標題 符号化アレイ探触子を用いた管内気泡の音響撮像
3. 学会等名 電気学会 第25回知能メカトロニクスワークショップ (IMEC_2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 福本慎一郎, 村田頼信
2. 発表標題 超音波探傷におけるスパースモデリングを用いた隣接欠陥の検出
3. 学会等名 第25回知能メカトロニクスワークショップ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本一貴, 村田頼信
2. 発表標題 符号化アレイ探触子による管内気泡の音響撮像
3. 学会等名 2019年度 SICE関西支部・ISICE若手研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山本将一朗, 山本一貴, 村田頼信
2. 発表標題 M 系列符号化アレイ探触子による管内気泡の可視化に関する研究
3. 学会等名 電気学会 第26回知能メカトロニクスワークショップ (IMEC_2021)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関