

報告日 2021年(令和3年) 6月 1日
報告者 北海道大学 大学院工学研究院 助教
朴 炫珍

1. 研究概要

(和文)

(1) 課題名 (日本語)

超音波パルスを用いた狭隙間流れにおけるボイド率のモニタリング技術の開発

(2) 研究者氏名

朴 炫珍

(3) 研究概要 (日本文)

油圧機器の作動油は非常に狭い隙間を流れる。この隙間を流れる際に気泡が混入するとマシントラブルが生じるため、トラブルが生じる前に気泡の混入具合を監視する必要がある。本研究は、非破壊検査である超音波パルスエコーグラフィーでこの気泡流を計測することを目的に、パルスの反射波形を分析することで流路内の空隙率と気泡サイズを推定する測定法を開発した。数値解析を用いて、反射波形の減衰と位相速度がボイド率と気泡サイズの関数として表現可能なことを示した。これらの関数を連立し解くことでボイド率と気泡サイズを推定できる。また、新規計測法を実際の流れに適用し、計測値が妥当であることを実験的に示した。

(4) キーワード

エコーグラフィー, 気泡, 計測技術, 隙間流れ

(英文)

(1) Research title

Development of monitoring technique for a narrow gap flow using ultrasonic pulse

(2) Name of researcher with title of position

Hyun Jin Park, Assistant Professor, Hokkaido University

(3) Summary

Small bubbles suspended in liquid in narrow gaps often adversely affect machines and their monitoring is required to avoid machine troubles. Traditional measurement method adopting continuous acoustic waves and the Wood's equation cannot detect such small bubbles because of multiple reflections within narrow gaps. This requires a short ultrasonic pulse to surmount multiple reflections. In this research, we proposed a method of instantaneously measuring a void fraction and a major bubble size in a narrow-channel bubbly-flow using an ultrasonic pulse. From results of numerical analysis of the pulse behavior, attenuation of the pulse was judged

useful to estimate a projection void fraction. Furthermore, the projection void fraction can be converted into local void fraction via probability equation as a function of the bubble size. Meanwhile, phase and group velocities can be approximated by functions of the void fraction, the ultrasound frequency, and the bubble size. Here, because the frequency is predetermined, we can estimate the void fraction and the bubble size by solving simultaneous equations. To verify the efficacy of present method, we compared results of a demonstration of the proposed method and a simultaneous optical visualization of microbubbles. From the comparison, it is confirmed that the ultrasonic measurement utilizing attenuation and phase velocity of ultrasonic pulse provided reasonable results of projection void fraction, the void fraction and the bubble size.

(4) Key Words

Echography, Bubble, Measurement technique

2. 本研究の意義・特色

油圧機器の油圧回路内で高流速・低圧力条件になると、溶解空気が分離され油中に気泡が生じ、様々な機械トラブルを引き起こす。オイルメーカーでは溶存気体を減らすために油に添加剤を入れるなどの対策をとっているが、溶存気体を完全に無くすことはできない。油圧機器の故障を防ぐためには、機器内部の隙間流れを計測・監視し、ボイド率が高まる危険な状態になると故障が起きる前に運転を停止させなければならない。

油圧機器のように金属壁で囲まれた流路内のボイド率計測には、音波による非接触型の計測が適している。一般に、音波による計測は気泡の収縮・膨張による音速の低下を用いるが、油圧機器の流路は幅が音波の波長より狭く、壁面エコーの干渉で音速測定が難しい。また、干渉を避けるために、波長が短い MHz オーダーの超音波を使用すると、音波の周波数が気泡の共振周波数より十分に高くなるため、収縮・膨張による音速変化がほとんど生じず、既存の測定法が使えない。このように超音波で狭隙間内のボイド率を計測するには、既存の計測法が使用できないため、既存の計測法とは全く別の新しい計測法が必要になる。

申請者は、気泡の共振周波数より十分に高い周波数の超音波を気液混相流体に照射すると、気泡が収縮・膨張する前に超音波が気泡を通り去るため、気泡が固体の粒子のような挙動を示すと仮定した。この仮定が正しければ、数サイクルの超音波パルス照射することで、超音波と気泡との干渉が生じてパルス波形が歪み、見かけの速度である位相速度の上昇と、超音波の進路を気泡が塞ぐことによる流路壁からの反射波の振幅が減少する。実験により音波を高時間分解能で計測した結果、実際に位相速度の上昇と振幅の減少が確認された。また、数値解析により波形の変化とボイド率との関係式を数値解析で求め、超音波を用いた隙間流れのボイド率と気泡径の推定法を開発することに成功した。

3. 実施した研究の具体的内容、結果 (本文)

本研究は、本研究は、超音波パルスを用いて狭い流路を流れる気泡流をモニタリングすることを目的に、三つのフェーズで研究を進めた。フェーズ 1 と 2 では、モデル実験と数値シミュレーションを同時に使用して計測原理を構築した。その後フェーズ 3 で、モデル実験を通して性能を評価した。下記にフェーズごとの研究内容を説明する。

【フェーズ 1】狭隙間内微細気泡がもたらす超音波エコーの変化有無の確認

隙間を流れる気泡により超音波のエコーに変化が生じるかを調べるために、図 1(a)に示すモデル実験を構築した。流路幅 H は 2 mm であり、上壁面は気泡の光学可視化ができるように透明アクリル板になっている。モデル実験における流路幅と実際の油圧機器でみられる隙間の大きさに大きな差が存在するが、流路幅を大きくした理由は可視化を行いやすくするためである。一般的に、音の伝播には幾何学的相似が成り立つので、流路幅の拡大比に合わせて超音波の波長と気泡サイズを拡大させることで現象の再現が可能である。流路にはバルク流速 0.6 m/s で水と空気を流した。光学可視化より確認された気泡サイズは 50-300 μm であった。本実験では、気泡の共振周波数の影響を回避するため、共振周波数の 10 倍以上高い 4 MHz の超音波パルスを使用した。超音波パルスは、上壁面の外部に設置した超音波トランスデューサから発振し、またまた同じトランスデューサで反射波を受信した。受信した反射波は 100MHz のサンプリングレートで記録した。

図 1(b)に気泡有無における反射波を示す。気泡により、流路の下壁面からの反射波の波形が変わっており、具体的には位相が Δt_{phase} 早まり、振幅が E_0 から E_a に減少した。気泡が共振周波数より十分に高い超音波にも影響を及ぼすことが確認されたので、次に、ボイド率の変化に変化量が追従して変化するかを調べた。結果、図 2 に示すように、ボイド率 α の増加と共に下壁面からの反射波の振幅は減少し、式(1)で定義する音速（位相速度）は増加する傾向が確認された。

$$c_{\text{phase}} / c_{\text{water}} = 2H / (2H + \Delta t_{\text{phase}} c_{\text{water}}) \quad (1)$$

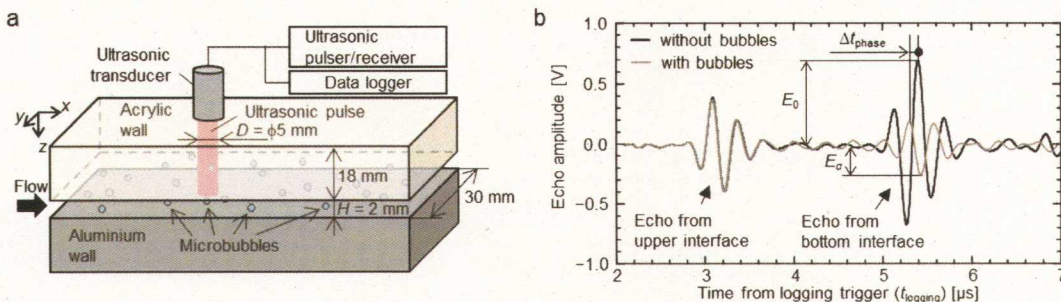


図 1 狭隙間気泡流のモデル実験。(a)実験装置の概要図と(b)取得したエコー信号

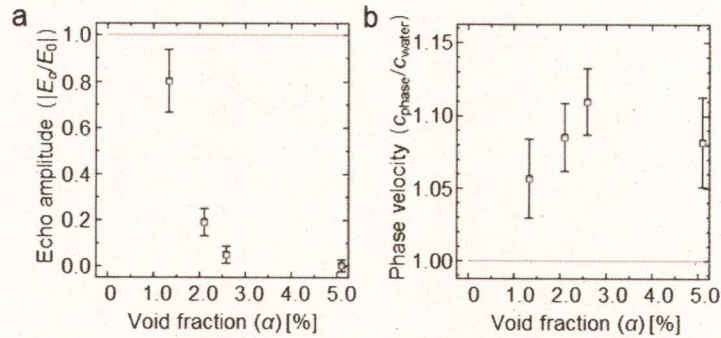


図2 気泡により変化する下面壁面からの反射エコー。(a)振幅と(b)音速(位相速度)

【フェーズ2】 数値解析による計測手法の構築

フェーズ1で反射波の振幅と音速がボイド率によって変わるところは確認したが、それ以外のパラメーター(気泡サイズ d など)にも影響を受ける可能性がある。実験で全てのパラメーターを制御することは難しいため、数値解析でモデル実験を再現し研究を進めた。

図3に数値解析をする際に用いた三次元空間とトランスデューサで受信した液相の下面からの反射エコーを示す。液相の高さはフェーズ1のモデル実験と同様に2mmに設定し、単一サイズ($d = 40 \sim 280 \mu\text{m}$)の気泡を一定のボイド率($\alpha \leq 7\%$)で液相のランダムな位置に配置させた。計算スキームはFDTDであり、時・空間ステップは2nsと40 μm である。気液界面では、音波が全反射すると仮定し、固相と液相に対して音響解析を行った。図3(b)より、ボイド率が高いほど反射波の振幅 E が減衰し、かつ位相が早まっていることがわかる。FDTDでは気泡の収縮・膨張を無視するため、気泡による超音波の散乱のみがこの反射波の変化をもたらす。振幅変化の比 $|E_d/E_0|$ と、位相変化 Δt_{phase} と式(1)で計算される位相速度と初期音速の比 c_{phase}/c_0 が気液混相流体の特徴(気泡の空間分布、ボイド率 α と気泡径 d)と音波の特徴(周波数 f)に依存すると仮定し、これらの変数が波形に与える影響を調査した。

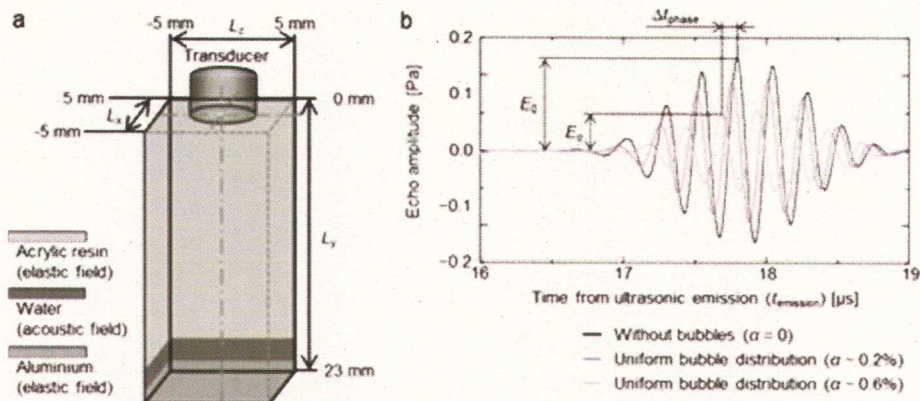


図3 モデル実験を模擬した数値解析。(a)計算領域と(b)下壁面からの反射波 ($d = 40 \mu\text{m}$)。

パラメータスタディの結果を整理し、図4に示す。気泡の空間分布は、反射波に影響を及ぼさなかったため、データの図示を省略した。図より、 $|E_d/E_0|$ は投影ボイド率 α_p のみに関

数であり, c_{phase}/c_0 は $\alpha (c_0/fd)^{1.5} < 0.5$ の範囲で $\alpha (c_0/fd)^{1.5}$ の線形関数に近似できる. 最小二乗法を用いて, これらの変化を次式で近似する.

$$|E_a/E_0| \sim 1 - 2.71\alpha_p + 2.42\alpha_p^2 - 0.71\alpha_p^3, \quad 0 \leq |E_a/E_0| \leq 1 \quad (2)$$

$$c_{\text{phase}}/c_{\text{water}} \sim 1 + 0.28\alpha (c_{\text{water}}/df)^{1.5}, \quad c_{\text{water}} \leq c_{\text{phase}} \quad (3)$$

式(2)の $|E_a/E_0|$ は α_p に対して単調に増加するので, $|E_a/E_0|$ が分かれば α_p の値は一つに決まる. 一方, 式(3)では, f は既知なので, c_{phase}/c_0 を分かっても α と d が未知数として残る. これらの未知数の解を得るためには, α_p を α と d の関数で表現し, 方程式を連立しなければならない. ここで, 複数の単一サイズ気泡がランダムな位置に存在する一定サイズの空間を考える. 統計的な推計により, α を α_p と d のべき乗関数で表すことができる. しかし残念ながら, 理論的にべき乗の係数を求めることは難しいため, 本研究では図 4(c)に示す数値解析の結果より係数を推定し, 式(4)を作った.

$$\alpha \sim 115(d/1\text{m})^{0.82} \alpha_p^{1.23}, \quad 0 \leq \alpha_p \leq 1, \quad 0 \leq \alpha \leq 1 \quad (4)$$

式の中で d は 1m の単位長さで割って無次元化している. 式(2)で α_p が決まっているので, 式(3)と(4)を連立させると, α と d がそれぞれ式(5)と(6)のように求まる.

$$d \sim \left[32.2c_{\text{water}} (c_{\text{water}}/f)^{1.5} \alpha_p^{1.23} / (c_{\text{phase}} - c_{\text{water}}) \right]^{1.47} (1\text{m})^{-1.205} \quad (5)$$

$$\alpha \sim (7.57 \times 10^3) (c_{\text{water}}/(1\text{m})f)^{1.81} \alpha_p^{2.71} [c_{\text{water}}/(c_{\text{phase}} - c_{\text{water}})]^{1.21} \quad (6)$$

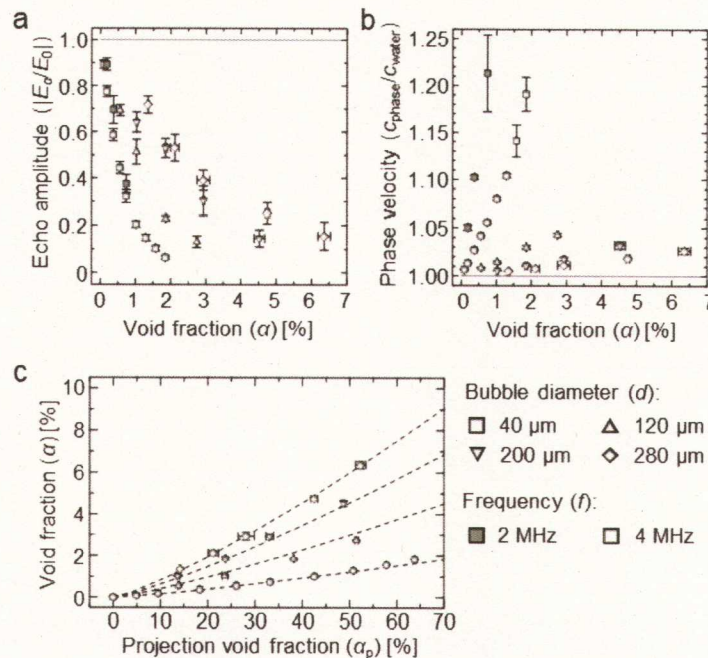


図 4 数値解析により得られたボイド率における反射波の変化. (a)振幅と(b)音速.

【フェーズ3】 デモ実験による検証

数値解析により得られた式(5)と(6)の有効性を確認するため、フェーズ1で行ったモデル実験を再び行った。図5(a)にトランスデューサ周辺で撮影した時系列画像を、(b)に同期計測で得た流路下壁面からの反射波を示す。計測開始から2s後に気泡が流れ始めっており、気泡が存在する時間帯で超音波の波形に変化が現れる。図1(b)と同様に、反射波の位相が早まって、かつ振幅が減少している。この反射波の変化を用いて、新規計測方法で求めた α と d を図4(c)と(d)に示す。まず d を見ると、計測から3s付近の大きくばらつくが、4s以降は約100 μm で一定の値を持つ。 α では、 d と同じく3s付近でばらつくが、4s以降は徐々に値が増加し、最終的におよそ2%になる。気泡の注入条件を考えると、 α と d の計測結果は両方とも過小評価される傾向があるが、全般的な傾向は正しく捉えている。可視化画像より確認された気泡の平均直径は約150 μm であり、本実験で与えた最大のボイド率が3%なので、超音波による計測は全体的に値が過小評価されている。ボイド率 α と気泡径 d を求める際に用いる式(5)と(6)において、その係数が数値解析の結果のみで決まっているため、実現象と数値モデルの乖離がこの過小評価の原因だと思われる。今後、式の係数を更新することで、 α と d の計測精度の向上が期待できる。

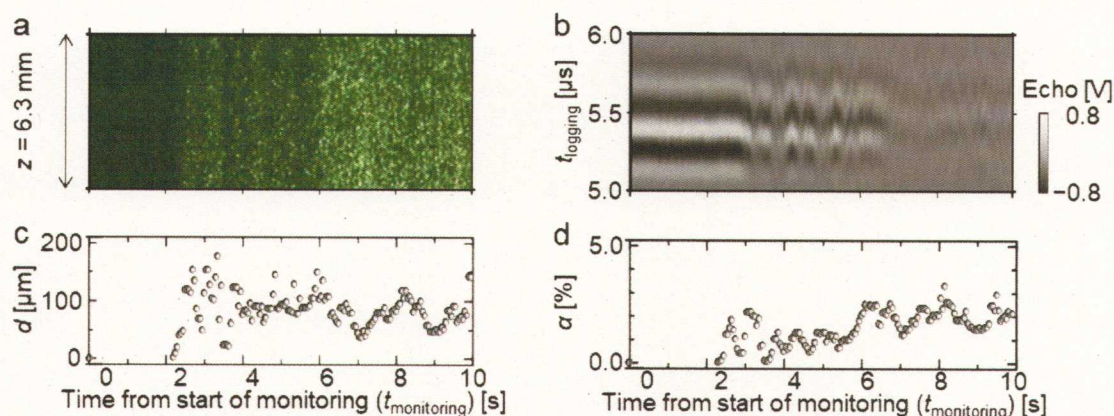


図5 実験結果：(a)気泡の光学可視化、(b)下壁面のエコー、(c)気泡サイズと(d)ボイド率。

4. 本研究を実施したグループに属するおもな研究者の氏名・役職名

朴 炫珍 ，北海道大学 助教
村井 祐一，北海道大学 教授
田坂 裕司，北海道大学 准教授

5. 研究実施時期

2020年(令和2年)1月1日から 2021年(令和3年)3月31日

6. 本研究に関連して発表した主な論文等

(学会発表)

- ① H.J. Park, S. Akasaka, Y. Tasaka, Y. Murai. Ultrasonic measurement for void fraction and size of microbubbles in a thin channel flow. Korean National Congress on Fluids Engineering, FR05.04, 12-14.Aug.2020.
- ② 朴炫珍, 赤坂信太郎, 田坂裕司, 村井祐一. 隙間流路における微小気泡の超音波モニタリング技術. 混相流シンポジウム, 0055, 21-23.Aug.2020.

(論文発表)

- ③ H.J. Park, S. Akasaka, Y. Tasaka, Y. Murai.. Measurement of the void fraction and bubble size in narrow-channel flows using ultrasonic pulses with a super bubble-resonant frequency, IEEE Sensors Journal, Vol. 21, pp. 273–283, 2021.

7. 内外における関連研究の状況

国内では超音波を用いた気泡流計測がパイプ流れ（東京工業大学の木倉教授や神戸大学の村川准教授など）に対して行われており、微小流路に関してはあまり研究されていない。

一方、国外では Aix-Marseille University (France) の Serge Mensah 博士が、音響スペクトロメーターを用いた隙間流れ中の微小気泡の測定法を開発している。本技術より精度の面では優れているが、計測機器が複雑になりかつ計算負荷が大きいのが弱点である。本技術は小型化が可能であり、かつ計算負荷が少ないのでモニタリングに向いている。類似した技術として、壁面の反射波を周波数解析することで、流路幅を計測する方法（Rob Dwyer-Joyce 教授, University of Sheffield, UK）なども存在する。

8. 今後の発展に対する希望

マシンのトラブルを防ぐために高い安全率を持たせて油圧機器を設計・運用していたが、近年高い性能が要求されるようになり、この安全率を下げざるを得ない状況になっている。新規に開発した本計測法は、油圧機器の外部から音波によりマシントラブルの前兆をつかむことが可能であるため、既存の油圧機器をより高い性能で運用することが可能である。

また、本計測法は気泡流以外にも適用可能である。今回の計測対象を気泡に限定し、流れの周辺環境（流路厚さや温度など）を固定して計測法の開発を進めたが、気泡なしの流れに限定すると流れの周辺環境の測定も可能になる。実際に、この計測法を応用しベアリングの液膜厚さの計測に取り組んでいる。そして、流れに限定しないのであれば、フィルム内部の物質の含有率なども、今回の計測法と同様な方法で推定可能であり、今後、この計測法を様々な計測対象に展開できる。

新規開発のこの計測法は位相速度と減衰率を用いているので、二つのパラメーターまで同時に計測可能である。もし、超音波の波形からより多くの情報を引き出すことができるならば、より多くのパラメーターを同時に計測可能になる。