

【研究紹介】

超音波パルスドップラ法の高度化と混相流計測への応用

村川 英樹^{1*}

¹工学研究科機械工学専攻

(受付:February 9, 2016 受理:March 29, 2016 公開:April 4, 2016)

キーワード: UDM, UVP, 速度分布, 流体計測, マルチウェイブ超音波法, 気液二相流

1. 緒言

超音波パルスドップラ法 (UDM; ultrasonic pulsed Doppler method) は, 医療分野において血流の速度計測を目的として1960年代から開発されてきた。本手法は, 不透明流体や不透明配管において非接触に, 測定線上の一次元瞬時速度分布が計測できることが特徴である。これらの利点に着目し, Takeda²⁾によって工学分野への応用がなされた。工学分野では本手法をUVP (ultrasonic velocity profiler) と呼び, テーラー渦流れや非ニュートン流体の時空間情報の取得など, 様々な工学分野に応用されている³⁾。

著者は, 気液二相流計測を目的として, 本手法の高度化と混相流計測への応用について取り組んできた。その研究業績に対し, 2014年 日本混相流学会 奨励賞「超音波パルスドップラ法の高度化と混相流計測への応用」を受賞した。本稿では, これら一連の研究および, 現在取り組んでいる流量計への応用に関して紹介する。

2. 超音波パルスドップラ法

超音波が移動体に反射すると, 移動体の速度に応じたドップラ周波数 f_d が基本周波数 f_0 に付加され, これを解析することで移動体の速度を求めることができる。しかしながら超音波計測では, 媒質中での音速 c に対して計測対象の速度が数桁程度遅いため, f_0 に対して f_d は数桁程度小さくなる。超音波パルスを用いる本手法では周波数スペクトルが広くなり, 1回の受信によって得られたエコー信号から f_d を直接求めることは困難である。そこでパルスドップラ法では, 一般的に複数回のエコー信号から f_d を求めている^{4), 5)}。

パルスドップラ法におけるドップラ周波数算出手法の模式図を図1に示す。超音波の測定線上の各位置で生じるエコー信号からドップラ周波数を算出するため, 基本周波数 f_0 のバースト信号で超音波パルスを繰り返し送受信する。得られたエコー信号を, パルスの送信から一定の時間にサンプリングし, その位相を虚数空間上で示したのが下図である。超音波の送信間隔 $T = 1/f_{\text{prt}}$ において反射体が僅かに移動することで, エコー信号の位相が $\Delta\theta$ 変化する。複数回のパルスの送受信によって得た平均位相差 $\overline{\Delta\theta}$ は以下の式で表される。

$$\overline{\Delta\theta} = 2\pi f_d T \tag{1}$$

これより反射体の移動速度 v は,

$$v = \frac{c \cdot f_d}{2f_0} = \frac{c \cdot \overline{\Delta\theta}}{4\pi f_0 T} \tag{2}$$

で表される。反射体の位置は, 超音波の送信からエコー信号受信までの時間で算出できる。測定線上の各位置に存在する粒子からの反射波に対して, それぞれ速度を算出することで, 測定線上の一次元速度分布が計測できる。

3. 二相流計測への応用

3.1 超音波ビーム径の違いによる反射体の選択性

超音波計測では, 発信される超音波とその基本周波数, およびビーム径はそれぞれ密接に関係している。一般に, 発信超音波の指向性および強度分布は超音波の二つのパラメータである基本周波数と空間内超音波ビーム径 (D_{US}) の関係に依存するため, UDM 計測では送受信する超音波トランスデューサについて, $f_0 = 8 \text{ MHz}$ では $D_{\text{US}} = 2 \sim 3 \text{ mm}$, $f_0 = 2 \text{ MHz}$ では $D_{\text{US}} = 10 \text{ mm}$ 程度のセンサが選択されてきた。 D_{US} は計測の測定体積に影響し, 特に混

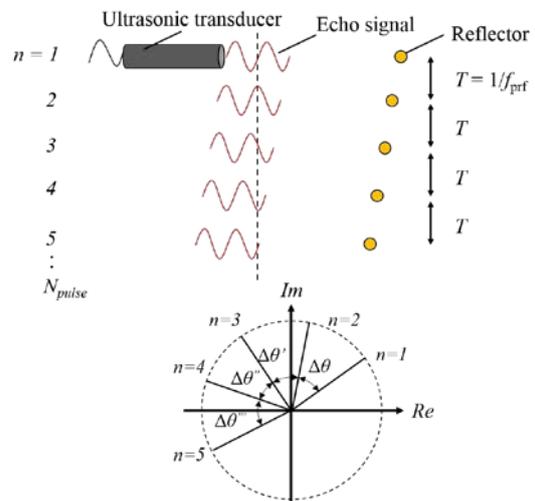


Fig. 1 Detection of the Doppler frequency.

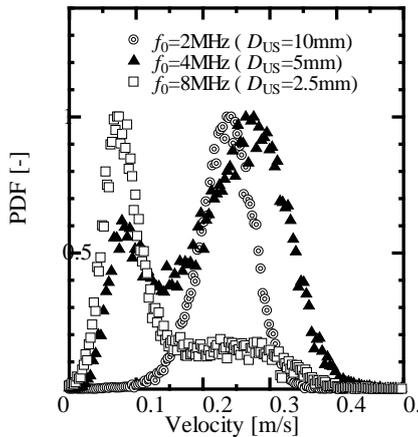


Fig. 2 Velocity probability density function in bubbly flow for different D_{US} .

相流では計測結果に影響を与える要因となる。図2は $20 \times 100 \text{ mm}^2$ の鉛直矩形管の気液二相流（ボイド率 $\alpha = 1.8 \%$ ）において、UDMを用いて計測した際の流路中心における速度の確率密度分布（PDF）である。 $D_{US} = 2.5 \text{ mm}$ では、液相の代表速度である約 0.07 m/s に最大値を示すが、 D_{US} を大きくすることで、液相よりも速い気泡の速度を計測する確率が高くなることを示している。すなわち、基本周波数（ D_{US} ）の違いによって、液相速度と気泡速度を選択的に測定できる可能性を示している。

3. 2 マルチウェイブ超音波法

UDMは計測線上の瞬時速度分布が計測できることから、気液二相流計測に適用した場合、得られた速度データには液相および気相の速度データが含まれる。測定線を超音波ビーム径より大きな気相が通過した場合、気液界面では超音波の反射率が高く、気泡後方の速度分布が計測できない。そこでUDMで気液二相流計測を実現するためには、得られた速度分布から気液両相の速度データを分離する必要がある。気液データの分離には、気液両相の速度差に基づいたデータ処理が用いられていた⁹⁾が、計測可能な条件が限定されるなどの課題があった。そこで著者らは、3.1節で示した D_{US} の違いによる反射体の選択性に着目し、マルチウェイブ超音波による計測手法を開発してきた⁷⁻⁹⁾。

図3にマルチウェイブ・トランスデューサの概略図を示す。本トランスデューサは外径13 mm、長さ60 mmで樹脂ケーシングされ、センサの先端部に直径3 mmの共振周波数8 MHzの圧電素子（内素子）と、その同心軸に外径10 mm、内径3 mmの中空状の共振周波数2 MHzの圧電素子（外素子）が埋め込まれ、それぞれの素子からリード線によりBNC端子に接続している。これにより内外それぞれの素子を独立に駆動することを可能とし、一つのセンサを用いて、同じ測定線上に異なる D_{US} による計測を実現させた。

本トランスデューサを気泡流に適用した場合、 D_{US} が比較的大きい2 MHzのセンサで、大きな反射体である気泡速度が主に計測でき、 D_{US} の小さい8 MHzのセンサでは、



Fig. 3 Schematic of multi-wave transducer.

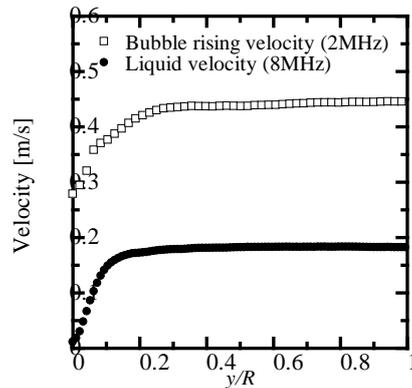


Fig. 4 Time-average velocity distribution in two-phase flow.

液相に混入させた粒子からの反射波により主に液相速度を計測する。しかしながら図2に示したように、計測速度の一部に気泡速度が含まれることから、速度PDFを統計処理し、気泡速度を除くことで液相速度分布を算出する。以上の処理によって得られた、円管内気泡流における時間平均速度分布を図4に示す。 y は壁面からの距離、 R は管半径である。これにより、一つのセンサによって気相・液相速度分布の計測を実現した。この手法を更に発展させ、2台のパルサ・レシーバを用いて2 MHz、8 MHzによる超音波の同時送受信を行い、得られた二つの瞬時速度分布から気液の速度分布を計測する手法も開発している¹⁰⁾。

4. パルスドップラ法の高度化

4. 1 計測速度限界拡張法

2章で示したように、UDMでは複数の超音波パルスの送受信によって、反射波の位相変化 $\Delta\theta$ を計測している。そのため、反射体の移動速度が速く、パルスの送波周期 T に $\Delta\theta$ が $\pm\pi$ を超える場合、正しい $\Delta\theta$ が計測されなくなる。このことを速度エイリアシング（折り返し現象）と言う。そのため $\Delta\theta$ が $\pm\pi$ を超えない速度が計測限界速度 v_{\max} となり、以下の式で表される。

$$v_{\max} = \frac{c}{4f_0T} \quad (3)$$

v_{\max} を大きくするためには T を小さくすることが有効である。反射体の位置は、超音波パルスの送信からエコー信号の受信までの時間遅れによって検出しており、 T と計測可能な最大距離 L_{\max} は、以下の関係がある。

$$L_{\max} = \frac{cT}{2} \quad (4)$$

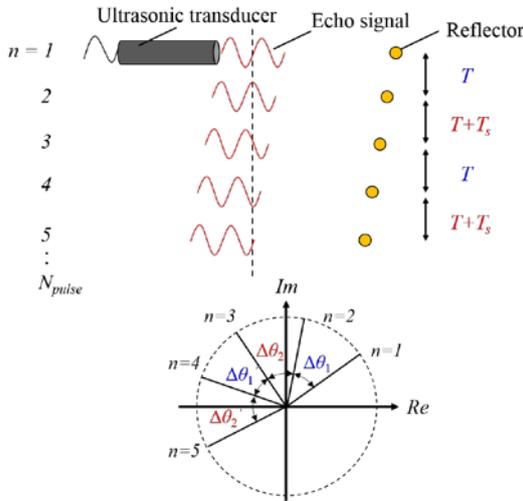


Fig. 5 Dual PRF (pulse repetition frequency) method.

以上から、 v_{max} と L_{max} を同時に大きくすることができないことがわかる。そこで、異なる周期で交互に超音波を送受信する二周期法を導入し、 v_{max} を超える速度の計測を試みた。

図5に二周期法の模式図を表す。超音波の送波間隔を T および $T+T_s$ とし、送波周期 T による位相差 $\Delta\theta_1$ と、 $T+T_s$ による位相差 $\Delta\theta_2$ の差を求める。これにより v_{max} を以下の式で表すことができる。

$$v_{max} = \frac{c}{4f_0 T_s} \quad (5)$$

この時、 L_{max} は式(4)と同じため、 T_s を小さく設定することで、広い範囲の速度分布を、原理上は速度の制限無しに計測可能である。

4.2 計測限界速度拡張法と流量計測への応用

二周期法では、 T が固定の一般的な手法(従来手法)と比べ、速度計測精度が低下する。そこで著者らは、二周期法を基にした補正手法を提案し、流量計測への応用を行った¹²⁾。配管径 $D = 200$ mmの水平円管において、流量 $Q = 500$ m³/h (レイノルズ数 $Re = 8.5 \times 10^5$)で計測した時間平均速度分布を図6に示す。指数法則による速度分布を実線で、従来手法で計測可能な最大速度を破線で示す。壁面近傍は速度勾配が大きく、このような領域では空間分解能の大きさが計測精度低下につながり、速度が過小に計測されている。しかしながらそれ以外の領域では、従来手法に比べて速い速度が計測可能であることが分かる。更に流れ場が軸対象であることを仮定し、速度分布を周積分することで流量を算出した。結果を図7に示す。横軸が秤量タンク法によって計測した参照流量 Q_{ref} 、縦軸が速度分布から算出した流量 Q_{UDM} 、 ΔL は超音波の測定線方向の空間分解能である。従来手法によって計測可能な最大流量は、約90 m³/hである。これより高い流量を計測するためには、 ΔL を計測速度に応じて適切に選択する必要があるが、500 m³/hの条件を約3%の誤差で計測可能とした。この誤差は、主に壁面近傍の速度計測誤差に起因してい

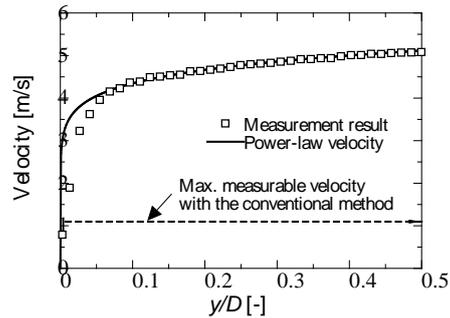


Fig. 6 Time-average velocity distribution.

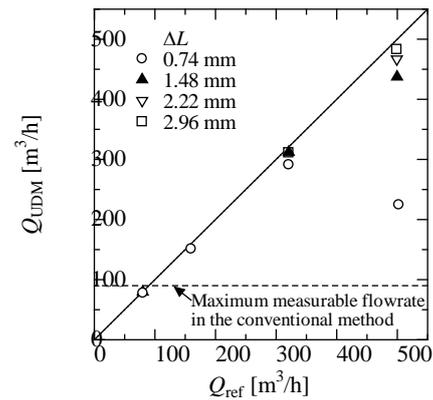


Fig. 7 Flow rate measurements.

る。そこで3.2節で示したマルチウェイ超音波法を用い、壁面近傍の測定体積を小さくして計測する手法を開発し、計測精度の向上も実現している¹²⁾。

工学プラントなどで使用されている一般的な流量計は、十分発達した軸対称流れでの計測を前提としており、設置には上流および下流に十分な長さの直管部必要とされる。更に実際の使用に際して、設置場所および経年変化等により検定通りの精度を保証することができない。しかしながら、本研究で紹介したUDMによる流量計では、複数の測定線によって偏流でも高精度に流量が計測可能である¹³⁾。更に、本手法をオンサイトで既存流量計のキャリブレーションに使用することも提案されており、既存流量計の精度向上にも寄与する技術である。

5. まとめ

超音波パルスドップラ法による速度分布計測について、計測原理、二相流および流量計への応用について紹介した。

超音波を用いた本手法は、測定線方向の一次元速度分布を、比較的容易かつ短時間に計測できることが特徴である。気液二相流ではマルチウェイ超音波法により、同一のトランスデューサを用いて気相・液相速度分布を計測可能とした。さらに、二周期法を応用したアルゴリズムを導入することで、従来は計測困難であった速い流れの速度分布計測を可能とし、流量計への応用が可能であることを示した。

References

- 1) Baker, D.W.; "Pulsed ultrasonic Doppler blood-flow sensing," *IEEE Trans. on Sonics and Ultrasonics*, SU-17(3) 170-185 (1970)
- 2) Takeda, Y., "Development of an ultrasound velocity profile monitor", *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 126, 277-284 (1991)
- 3) Takeda, Y. (ed.), "Ultrasonic Doppler Velocity Profiler for Fluid Flow", Springer (2012)
- 4) 村川英樹, 大上陽, 杉本勝美, 竹中信幸; "超音波パルスドップラ法におけるパルスの繰り返し回数とノイズによる速度分布計測への影響", *日本機械学会論文集 B 編*, 79(799), 356-367 (2013)
- 5) Murakawa, H., Sugimoto, K. and Takenaka, N.; "Effects of the number of pulse repetitions and noise on the velocity data from the ultrasonic pulsed Doppler method with different algorithms", *Flow Meas. Instrum.*, 40, 9-18 (2014)
- 6) Murakawa, H., Kikura, H. and Aritomi, M.; "Measurement of liquid turbulent structure in bubbly flow at low void fraction using ultrasonic Doppler method", *J. Nucl. Sci. Tech.*, 40(9), 644-654 (2003)
- 7) Murakawa, H., Kikura, H. and Aritomi, M.; "Application of ultrasonic Doppler method for bubbly flow measurement using two ultrasonic frequencies", *Exp. Therm. Fluid Sci.*, 29(7), 843-850 (2005)
- 8) 村川英樹, 木倉宏成, 山中玄太郎, 有富正憲; "マルチウェイ超音波を用いた気液二相流計測(相関法を用いた気泡速度計測)", *日本機械学会論文集 B 編*, 72(722), 135-142 (2006)
- 9) Murakawa, H., Kikura, H. and Aritomi, M.; "Application of ultrasonic multi-wave method for two-phase bubbly and slug flows", *Flow Meas. Instrum.*, 19(3-4), 205-213 (2008)
- 10) Nguyen, T.T., Murakawa, H., Tsuzuki, N. and Kikura, H.; "Development of multiwave method using ultrasonic pulse Doppler method for measuring two-phase flow", *実験力学*, 13(3), 277-284 (2013)
- 11) Murakawa, H., Muramatsu, E., Sugimoto, K., Takenaka, N. and Furuichi, N.; "A dealiasing method for use with ultrasonic pulsed Doppler in measuring velocity profiles and flow rates in pipes", *Meas. Sci. Tech.*, 26, 085301 (11pp) (2015)
- 12) Muramatsu, E., Murakawa, H., Sugimoto, K., Asano, H., Takenaka, N. and Furuichi, N.; "Multi-wave ultrasonic Doppler method for measuring high flow-rates using staggered pulse intervals", *Meas. Sci. Tech.*, 27, 025303 (11pp) (2016)
- 13) Wada, S., Kikura, H., Aritomi, M., Mori, M. and Takeda, Y.; "Development of pulse ultrasonic Doppler method for flow rate measurement in power plant: multilines flow rate measurement on metal pipe", *J. Nucl. Sci. Tech.*, 41, 339-346 (2004)