

超音波計測と数値計算の融合による複雑流体のメゾスケール挙動予測

国立研究開発法人 産業技術総合研究所 計量標準総合センター 主任研究員 芳田 泰基^{*}

1. 序論

1.1. 本研究課題における到達目標

近年、液晶材料をはじめとする高機能性流体の実用化が進む一方で、これらの流体の複雑な挙動を精度高く予測・制御する技術の確立が急務となっている。特に、ミクロスケールの分子構造が支配する局所物性と、マクロスケールの回路設計や装置動作といった工学的応用をつなぐ中間領域—いわゆるメゾスケール領域—における流動挙動の理解と予測は、流体力学や材料科学における未解決課題の一つである。

従来、この課題に対しては、数値シミュレーションを用いたマイクロレオロジーと、回転式レオメータ等によるマクロレオロジーの二つの手法が、それぞれ独立に発展してきた。しかしながら、両者の技術的分断と評価手法の細分化が進みすぎた結果として、これらの手法がメゾスケールの物理現象を十分に捉えられていないという現状がある。たとえば、市販のレオメータでは計測誤差が相対値で10~20%を下回らず、再現性や異常検出能力にも限界がある。また、数値計算によるモデル化においても、実験観測と計算結果の間に顕著な乖離が見られることが少なくない。これらの要因は、従来の物理モデルが流体の多様な非線形性や複雑構造を十分に組み込んでいないことに起因しており、経験則だけでは有効なモデル構築が困難であることを示唆している。

このような背景のもと、本研究は、実験計測と数値計算を統合し、メゾスケール領域における複雑流体の挙動を高精度に予測する新たなアプローチの確立を目的とする。本手法では、筆者が有する高精度な超音波計測技術および機械学習

手法を活用し、①メゾスケールに特化した実験評価ツールの開発と、②複雑流体に適したモデル式の自動獲得アルゴリズムの構築を進める。これにより、従来の手法では困難であった流体挙動の予測可能性が大きく向上し、材料設計やプロセス開発における新たな道を拓くことが期待される。

本研究ではまず、メゾスケールにおける複雑流体の局所挙動を高い空間・時間分解能で捉えるための実験評価ツールの構築を目指す。従来のレオメータやPIV (Particle Image Velocimetry) では、分散相の微細構造や流れ場の非一様性を十分に可視化・定量化することが難しく、特にメゾスケール領域においては、局所的な流動・構造変化の検出に限界がある。

そこで本研究では、極微小サイズの分散体をトレーサ粒子として利用し、超音波を用いた流速場の非侵襲・高精度計測を実現する新たな流速センシング技術の開発に第一に取り組む必要がある。ナノ~サブミクロンオーダーの粒子を可視化できる基盤技術を創成することで、粘性が高く光学的に不透明な媒体においても、局所的なせん断流や構造変化を定量的に捉えることが可能となる。本報告における技術は、これまでブラックボックス的に扱われてきたメゾスケール現象の「見える化」を可能にし、マクロ・ミクロスケールを橋渡しする上で不可欠なデータ取得手段となる。

1.2. 極微小分散体の流動を計測する技術の開発

超音波流速分布計測法は、金属管内流れの可視化や流量計測、血流モニタリング、非侵襲的評価など、広範囲な産業用途で実用化されている。加えて、流体物理の解明を目指す学術的な研究にも不可欠な技術である。近年では、不透明液体のダ

^{*} (助成採択時) 国立研究開発法人 産業技術総合研究所計量標準総合センター 研究員

イナミクスや混相状態を含む複雑な流体レオロジーの評価において、重要な役割を果たしている。超音波流速分布計測の原理に関しては、さまざまな方法に基づいている。代表的なものには、超音波ドップラー流速計測法^[1] (UDV) や超音波時間領域相関法^[2] (UTDC) がある。これらの原理を基に、多次元の流速ベクトル情報を取得する技術は目覚ましい進展を遂げている。したがって、流速分布計測技術の進歩という観点から、超音波を用いた流体可視化技術は着実に発展している。

一方で、超音波を利用した流速分布の測定には依然として実用上の課題が存在する。その一つは、「トレーサ粒子（分散体）のサイズに関する技術的制約」である。超音波流速分布計測における信号処理では、エコー信号に求められる要件が存在する。UDV や UTDC など、代表的な手法では、超音波波長の 1/4 以上の大きさを有する粒子が望ましいとされる。例えば、水中で 8 MHz の超音波を使用する場合、粒子の下限サイズは数 10~100 μm 程度である。当然粒子が大きいほど、超音波のエコー信号強度は増加する。その分、流速計測は容易になるが、粒子の持つ「流れに対する追従性能」が損なわれる。流れの可視化、その精度を担保する上で流れに対する追従性能は重要である。ストークス緩和時間や乱流中での粒子の位相差・振幅比など、追従性を定量評価する指標はいくつか存在する^[3]。一般的には、小さく、かつ低密度の粒子は、流れに対して優れた追従性を持つ「理想的なトレーサ」として取り扱われる。

本研究で提案するのは、画像処理型超音波速度計測法^[4] (IPUV) である。0.1 μm に匹敵する極微小分散体をトレーサ粒子として利用する新たな超音波解析法である。従来の方法は、微小な粒子で流速計測を実現するために、超音波の発信周波数を高くする必要がある。対して、IPUV は、

超音波の波形とその解析方法に着目するアプローチであり、単純に周波数を高くするという手段を取らない。本報告では、IPUV の原理およびその妥当性について詳細に述べ、極微小粒子を対象とした計測結果を紹介する。

2. 画像処理型超音波流速分布計測法 (IPUV) の測定原理

本節では、画像処理型超音波速度計測法 (IPUV) の基本的な測定原理について説明する。IPUV 解析には、超音波の時空間音圧分布が必要となる。水平軸と垂直軸は、それぞれ超音波の飛行時間（液相の音速と乗ずることで超音波の伝播距離と同義）とパルス繰り返し時間を表す。超音波音圧分布の収録には、超音波トランスデューサ、パルスレシーバ、高速デジタイザ、外部クロック生成器を用いる。パルスレシーバは数十波のチャープパルスを生成する機能を有し、5.4 MHz の帯域幅を持つ固有周波数 8 MHz のトランスデューサを介して、エコーを受信する。このトランスデューサは、約 3~13 MHz の広い帯域のエコーを受信できる。前処理として、音圧の時間平均分布で背景差分処理を施し、定在するノイズを除去する。

大まかな解析の流れは、次の通りである。①超音波エコーの時空間データ (Fig. 1(a)) から $N \times M$ の解析窓を作る (Fig. 1(b))。ここで、 N と M は奇数の自然数とする。 N と M は IPUV における解析精度に影響するため、適当な調整が必要である。②解析窓と同じサイズの二次元のガウス分布を乗算する (Fig. 1(c))。この処理を行うことで、解析窓中心に近い波面情報が重みづけされるため、解析における誤差が緩和される。③二次元フーリエ変換を施す (Fig. 1(d))。この処理によって、波面の方向がスペクトル強度として現れる。

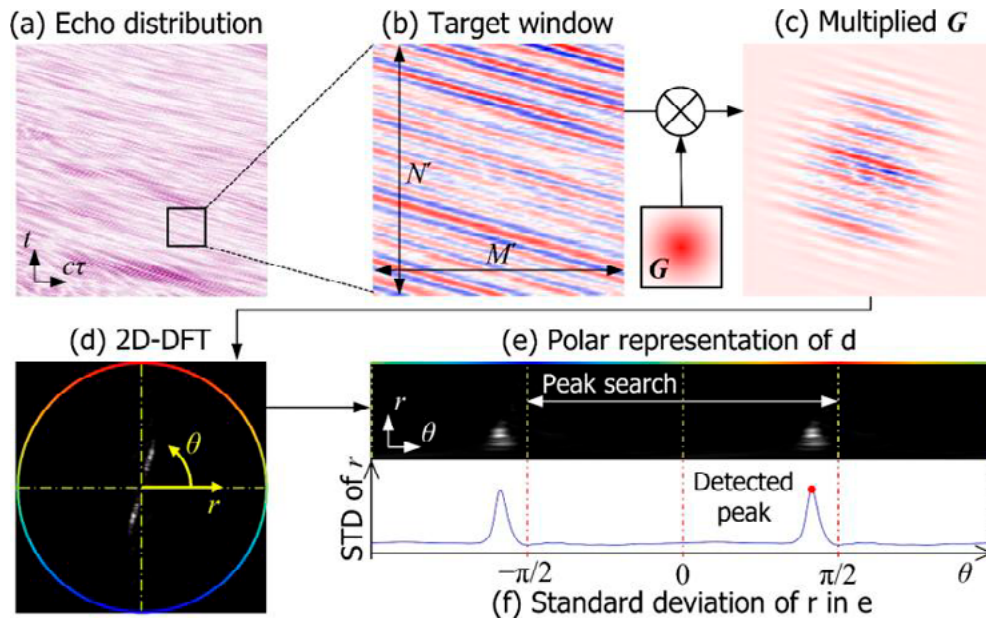


Fig. 1 IPUV の解析手順：(a) 超音波エコー波形の音圧強度時空間画像、(b) 解析窓画像、(c) ガウス分布を乗じた解析窓画像、(d) 2次元フーリエ変換後画像、(e) 極座標変換後画像、(f) 極座標変換画像の半径方向の輝度値分散分布

④フーリエ変換画像を極座標変換する (Fig. 1(e))。⑤極座標変換画像の輝度値の半径方向に分散値を計算し、波面方向成分を θ として抽出する (Fig. 1(f))。極座標変換後の画像輝度に対して、分散計算をすることで波面方向角度 θ の決定確度が向上する。Fig. 1(b)における超音波エコーの時空間分布画像内の波面方向は、超音波を反射する粒子を分散する液体の流動速度の法線方向を反映する。解析窓内の波面方向を定量化し、流速を計算するのが、IPUV の基本原理である。Fig. 1(f)中の点は、検出された波面方向の角度位置を示す。受信波形がチャープ波の場合、広帯域の周波数を含むスペクトルが検出される。チャープ波を利用することによる IPUV の性能向上の有効性については、数値計算に基づいた評価が行われており、既報^[4]にて詳説されている。同様の解析手順を、解析窓を時空間の双方向にシフトし、逐次行うことで時空間の流速分布が得られる。この IPUV 解析は、画像処理のみで完結するため、GPU を用い

た並列計算による高速化が可能である。

流速は、上記解析方法で抽出した波面方向角度 θ から、

$$u = \frac{cf_{\text{prf}}}{2f_{\text{samp}}} \frac{M}{N} \tan \theta \quad \text{Eq.(1)}$$

で決定される。ここで、 N と M は解析窓の縦横データ数、 c は液体の音速、 f_{prf} は繰り返しパルス周波数、および f_{samp} はサンプリング周波数である。

IPUV における時間および空間分解能は、

$$\Delta t = \frac{1}{f_{\text{prf}}} \quad \text{Eq.(2)}$$

$$\Delta x = \frac{c}{2f_{\text{samp}}} \quad \text{Eq.(3)}$$

で与えられる。IPUV における計測可能距離と流速について、計測可能な深度（超音波送受信面からの伝播距離）は、超音波が反射して受信されるまでの伝播時間から、

$$x < \frac{c}{2f_{\text{prf}}} \quad \text{Eq.(4)}$$

で与えられる。また、流速の最大および最小測定範囲は、

$$\frac{20cf_{\text{prf}}}{Nf_{\text{samp}}} < |u| < \frac{cf_{\text{prf}}}{2f_d} \quad \text{Eq.(5)}$$

で見積もれる。ここで、 f_d は発信されたチャープ波の最高周波数を示す。この速度の測定可能範囲についての詳細は既報^[4]を参照されたい。

Fig. 2 は、超音波の基本周波数 f_d 、サンプリング周波数 f_{samp} 、およびパルス繰り返し周波数 f_{prf} 、それぞれの増減で変化する IPUV の測定可能流速範囲を示す。横軸は繰り返し周波数、縦軸は流速である。また、赤線は最大測定可能流速を示し、青線は最小流速の閾値を示している。

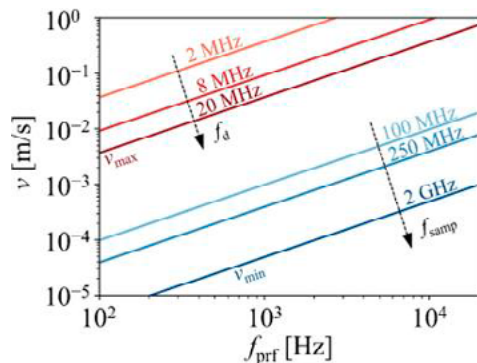


Fig. 2 基本周波数 f_d 、サンプリング周波数 f_{samp} 、および繰り返し周波数 f_{prf} に関する、IPUV の測定可能な速度範囲 ($c = 1480 \text{ m/s}$, $N = 151$)

Fig. 2 に示されるように、最大および最小流速の閾値は、支配周波数とサンプリング周波数の関数として変化し、から得られる。基本周波数 f_d の増加に伴って、最大測定可能流速範囲が制限される。一方、 f_{samp} の増加に伴い最小測定可能流速範囲は広がるが、より高速に電圧収録できるデジタイザが必要となる（費用的なコストが増加）。 f_{prf} の増減によって、最大測定深さと流速範囲が調整可能となる。 f_{prf} を適切に調整することで、対象流速の範囲に応じて計測パラメータが最適化される。

3. IPUV による計測例

まず、二重円筒間のクエット流れを対象として、実験による流速と理論値を比較した結果について報告する。

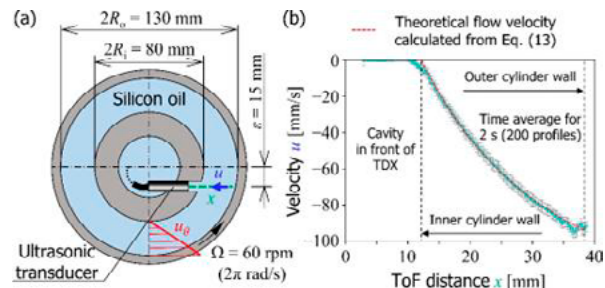


Fig. 3 (a) 広い隙間を持つ二重円筒の実験装置図、
(b) IPUV で測定した平均速度分布とクエット流れの厳密解との比較結果

動粘度 $300 \text{ mm}^2/\text{s}$ のシリコンオイルに、粒子径 $120 \text{ }\mu\text{m}$ のイオン交換樹脂を分散させ、Fig. 3 (a) のような二重円筒容器を用いて、流速分布を計測した。内側の円筒は直径 80 mm で、外側の円筒は直径 130 mm である。内側の円筒は固定、外側の円筒容器のみを 60 rpm で回転させた。上部は自由界面、底部は固定壁であり、円筒の高さは 130 mm であった。超音波トランスデューサは、円筒の軸中心から 15 mm ずらした位置に設置した。トレーサ粒子とシリコンオイルには密度差があるが、粘度は水の 300 倍あり、粒子の流れに対する追従性は非常に高いという実験設定である。Fig. 3 (b) に時間平均した流速の空間分布から計算した速度分布と、理論的に導出された速度分布を示す。ここで、プロットは実験による平均速度、破線はクエット流れの解析解に基づく速度分布を示す。Fig. 3 (a) に示すように、超音波トランスデューサの送受信面と内筒表面の間には隙間がある。Fig. 3 (a) から、その隙間の距離分を除いて、IPUV で計測した時間平均速度分布は、共軸二重円筒系におけるクエット流れの理論値と一致し

ていることがわかる。

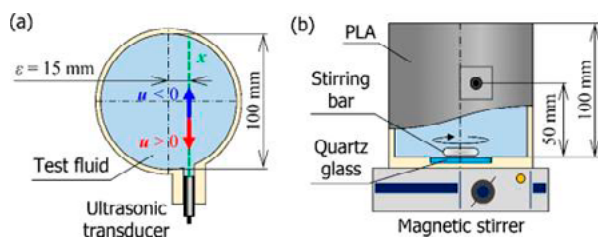


Fig. 4 攪拌流発生容器の模式図：(a) 超音波トランスデューサ軸方向の横断面図、(b) 縦断面図

次に、微粒子をトレーサとした流動計測結果について報告する。実験対象として選択した粒子は、粘土粒子のカオリン、板形状を持つ雲母粒子のマイカ、軽質炭酸カルシウムの微粒子の三種である。これらを水に分散させ、Fig. 4 に示す容器内に攪拌流を起こす。この容器は上部が開放されており、直径 100 mm、高さ 100 mm である。容器の中心軸から 15 mm ずらした位置に孔を設け、8 MHz の超音波トランスデューサを挿入した。容器下部には磁気スターラーを設置し、長さ 30 mm の攪拌子を 520 rpm で回転させることで、高さ 80 mm まで分散液で満たされている。本研究において開発する IPUV では、超音波トランスデューサに近づくか、遠ざかる方向の速度強度が取得される。

Fig. 5 は、一般的に用いられる超音波用の樹脂トレーサ粒子(Fig. 5(a)、120 μm 、密度 1.01 g/cm^3)と実験対象とした粒子の顕微鏡拡大写真である。カオリン (Fig. 5 (b)) は、代表粒子径が約 5~10 μm 、密度 2.6 g/cm^3 、不定形な微粒子である。マイカ (Fig. 5 (c)) は、雲母とも呼ばれる層状構造を持った鉱物粒子であり、簡単に剥がる薄い形状を持つ。球形近似粒径 (アスペクト比を考慮しない参考値) は、3 μm 、密度は約 2.7~3.0 g/cm^3 (製造原料に起因して変動) である。流線に沿って配向する特性を持ち、乱流渦の可視化実験にしばしば使用されてきた。軽質炭酸カルシウム (Fig. 5

(d)) は、細かいメッシュでふるい分けして製造されたものを用い、その平均粒子径は 0.7 μm 、密度は 2.7 g/cm^3 で、不定形な形状を持った粒子である。既報^[4]の付録では、流速分布計測の市販装置である UVP-DUO を用いて、マイカ分散液の流動を試みた測定結果について紹介しているので、関心がある場合はそちらを参照されたい。要約すると、市販されている超音波ドップラー法の解析装置では、マイカ粒子に匹敵する大きさの粒子を懸濁させた液体の速度計測は技術的に厳しいという結果である。

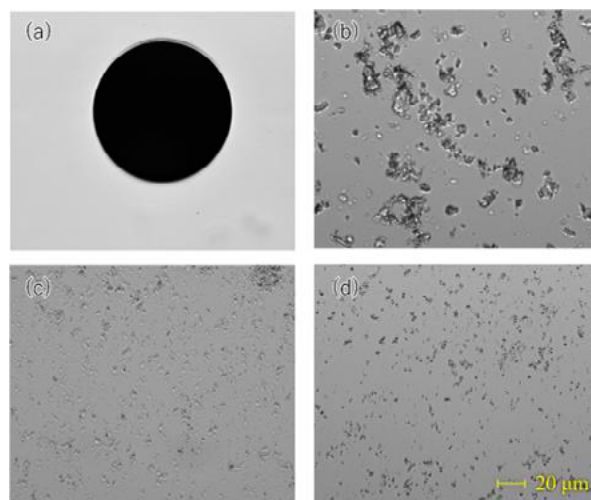


Fig. 5 計測対象とした粒子の顕微鏡写真：(a) イオン交換樹脂 CHP20/P120、(b) カオリン、(c) マイカ、(d) 軽質炭酸カルシウム

Fig. 6 に、樹脂トレーサ、カオリン、マイカ、軽質炭酸カルシウムの分散液における攪拌流を対象とした、IPUV による流速解析結果を示す。横軸は経過時間、縦軸はトランスデューサからの距離 (超音波飛行時間と液体音速の積)、濃淡は速度強度をそれぞれ示す。本計測条件では、円筒容器内に生成した攪拌流を対象としており、円筒の中心に近づくほど周方向速度は大きくなる。円筒容器の側面に設けた孔にトランスデューサを設置している幾何形状から、約 60 mm 程度で円筒の

中心に最も近づくと考えられる。

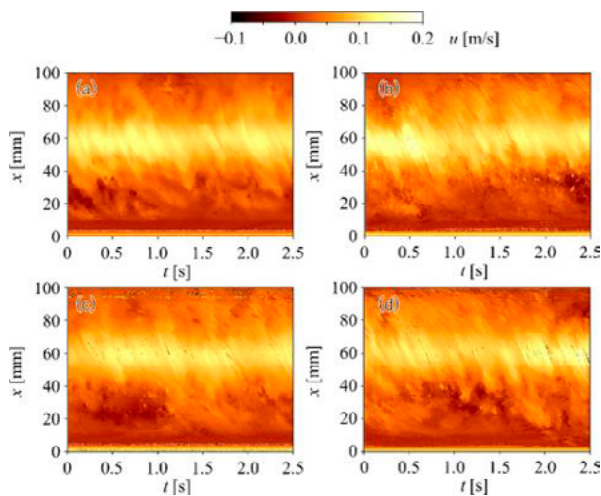


Fig. 6 各粒子をトレーサとして IPUV 計測した時空間流速分布：(a) イオン交換樹脂 CHP20/P120、(b) カオリン、(c) マイカ、(d) 軽質炭酸カルシウム

この距離において、[Fig. 6](#) の時空間流速分布からも流速が最大となる領域を確認できる。攪拌流では乱流渦に近い細かな流速変動が伴うが、その最大の領域は時間によらず変化しない。それぞれの粒子分散体の条件で比較しても、流速分布の傾向は定性的にほぼ一致している。従来から理想的なトレーサ粒子として使用されてきた樹脂トレーサより、100 倍以上小さな粒子でも流速計測が可能していることを示している。

IPUV の技術的な側面において白眉な点を挙げると、非常に微弱なエコー信号であっても機能が担保されることに他ならない。本報では紙面の都合上割愛するが、IPUV は低濃度条件（例えば、マイカでは 0.007 wt.%）から、高濃度条件（マイカでは 10 wt.%）まで計測が可能である。このような利点は、解析画像に対して二次元のフーリエ変換を施す処理を基盤にしたことから生まれている。既報^[4]における検証では、エコー信号に対して 5 倍のノイズを重ねても精度をほぼ損なわ

ずに速度評価が可能という報告がある。従来の技術である、UDV や UTDC では、直交検波や相互相関による信号処理が要求されるため、エコー信号がある程度強い強度で得られている必要がある。そのため、発信される超音波の波長に対して 1/4 以上の大きさを持った粒子、あるいは水に対して高音響インピーダンスを持った分散体（マイクロバブル等）が望ましいとされていた。板状の微粒子や、 $0.1 \mu\text{m}$ オーダーの粒子から得られる超音波エコー強度は非常に弱く、従来の超音波流速計測法で測定された事例はない。既報^[4]では、時空間速度分布の振幅スペクトルについて解析し、議論している。その結果から、粒子の種類に関係なく、周波数の増加に伴って、振幅スペクトル強度が単調に減少する傾向を示し、乱流渦における運動量拡散に起因する典型的な結果であった。しかし、10 Hz 以上の振幅周波数領域に注目すると、粒子の大きさ毎に、スペクトル強度に差が生じていた。大概して、代表的な粒子径が小さい粒子ほど、高い周波数での流速強度が高いことがわかった。つまり、細かな乱流変動に対しても追従している可能性が示唆された。攪拌流の乱流場には理論的な参照値が与えられる条件ではないため、決定的な証拠にはなり得ないが、同実験条件における相対的な変化という観点では議論の余地がある。

4. 結論

IPUV は、超音波を用いた流速分布計測法として初めて、 $0.1 \mu\text{m}$ の極微小分散体を対象に、 $O(0.001 \text{ wt.}\%)$ から $O(1 \text{ wt.}\%)$ という広範な濃度条件下での計測を実現した。これは、従来の超音波流速計測法における課題の一つである「適用可能な粒子径の制約」を大きく緩和する成果である。また、微小なエコー信号から流速分布を定量化で

きる特徴から、超音波センサ小型化や MEMS センサ化など、技術展開に伴う微弱エコー信号に対しても、十分に機能する可能性がある。

現在、食品や化学産業、微生物培養などでは、液部汚染の懸念からトレーサの人為的な添加が困難な計測環境が数多く存在する。分子コロイド、微生物、鉱物など、もともと液中に存在する極微小分散体を活用して流速分布を計測できる IPUV は、これまで諦められてきたような環境にも対応可能な新技術となる。「槽内の流れは実測できない」と半ば放棄されていた計測環境において、無添加での流速計測を可能にする技術として、IPUV には大きな展開可能性が期待される。

一方で、IPUV による流速計測の物理的背景は、依然として完全には解明されていない。波の反射・散乱には、粒子径に応じた波長の短さが求められるが、IPUV で解析された音圧波面の情報が、粒子単体ではなくクラスターによるエコーに起因するのかどうかは明らかでない。この根本的な計測原理の曖昧さについては、今後、異なる分散特性や流動条件を有する液体への IPUV の適用を通じて、解明を進めていきたい。

5. 参考文献

- [1] Yasushi Takeda, Walter E. Fischer, and Jun Sakakibara; Decomposition of the modulated waves in a rotating Couette system, Science, **263** - 514, (1994), 502-505.
- [2] Sanehiro Wada, and Noriyuki Furuichi;

Improving accuracy of pipe flow rate measurement with ultrasonic time-domain correlation method under small number density of reflectors, Measurement, **179**, (2021), 109439.

- [3] Adrian Melling, “Tracer particles and seeding for particle image velocimetry,” Measurement science and technology, **8** - 12 1406 (1997).
- [4] Taiki Yoshida, Sanehiro Wada, Noriyuki Furuichi; Image-processing-based ultrasonic velocimetry development with high applicability to flows in microparticle dispersion, Physics of Fluids, **36**, (2024), 053329.

6. その他成果発表等

- ・ 芳田泰基、画像処理型超音波流速計測法の応用例紹介：様々な微粒子をトレーサとした乱流計測，日仏間国際共同研究 SAKURA プログラム 2024 年度 報告会，北海道大学，2025 年 2 月 28 日.
- ・ 芳田泰基，極微小分散体をトレーサにする超音波流速分布計測法，混相流シンポジウム 2025，OS キーノート講演，神戸，2025 年 9 月.

7. 謝辞

このたびの研究は、島津科学技術振興財団の助成金を受けて実施されたものであり、心より感謝申し上げます。