

ストロボ効果を利用した粒子画像流速測定法による粒子速度分布の測定

MEASUREMENT OF PARTICLE VELOCITY DISTRIBUTION
WITH PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY USING STROBOSCOPIC EFFECT佐脇 真平*¹, 土屋 裕造*²
Shimpei SAWAKI and Yuzo TSUCHIYA

In order to investigate acoustic phenomena, complicated wave motion involves interference and diffraction, many attempts to visualize sound fields have been made. One of the promising approaches is the application to acoustic measurements of particle image velocimetry (PIV), which is an optical technique to measure flow velocity distribution. This method can be expected to contribute to our understanding of various acoustic phenomena because PIV can acquire the flow velocity distribution of fluid in a non-contact state. In the existing research applying PIV to acoustic measurements, high-speed cameras were used to capture the short-period vibration of air. Since, in general, high-speed cameras have small resolution and sensitivity, the method imposes a strict limitation on the size of the captured area. In this paper, a new measurement technique to visualize particle velocity distribution using PIV with stroboscopic effect is proposed. In this method, the measuring objects are limited to pure-tone-dominant steady state sound fields and the apparent period of the vibration is slowed down by flashing the light source at a specific frequency. As a result, the requirement for the frame rate of the camera is mitigated, and wider areas can be measured using cameras with high resolution and high sensitivity. A fundamental experiment with a sound tube was conducted, and the results show that our proposed method can measure particle velocity distribution with high accuracy.

Keywords : Acoustic Imaging, Particle Velocity, PIV, Stroboscopic Effect, Sound Tube
音場可視化, 粒子速度, PIV, ストロボ効果, 音響管

1. はじめに

音は干渉や回折により複雑に伝搬する波動現象であり、その振る舞いを解明するために音場を可視化する試みがこれまで数多くなされてきた。中でも粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry, 以下 PIV) によりカメラで空気中の粒子の振動を撮影する手法は、粒子速度の空間的な分布を非接触で測定できることから音響現象の理解に大きく貢献すると考えられる。音による空気振動は一般的なカメラでは撮影することのできない周期の短い振動であり、実時間での撮影には高速度カメラが必要である¹⁾。また高速度カメラを使用しない手法としては、単一周波数の定常音場に於ける瞬間的な流速を位相毎に測定し、同期加算した事例が報告されている²⁾。

後者の例のように対象音場の時不変性、周期性を利用する手法として、ストロボ効果を用いる方法も考えられる。ストロボ効果を利用して見かけの周波数を小さくすれば、カメラの撮像速度に対する要求を緩和することができ、高い感度と大きな画素数を有するカメラによる広い空間領域の測定が実現する可能性がある。また定量的な測定に先立って目視による音場の観察を行うことができるため、音響現象の理解、測定の効率化にも寄与するものと思われる。ストロボ効果による音場の可視化に関しては、ビーム走査型の光源を用いてその走査周期と音の周波数を同期させ、目視による定性的な検討を行った事例が報告されている³⁾が、粒子速度の定量的な測定にストロボ効果を利用した事例は見られない。本報ではストロボ効果を利用した PIV による音場計測の有効性を検証するため、音響管を用いた実験を行う。

2. 提案手法

PIV は流体の流速分布を光学的に測定する手法のひとつである。流体に追従して動くトレーサ粒子をカメラで撮影し、得られた粒子の連続画像を解析することで流体の流速を測定する。PIV を音場測定に適用するにあたり、測定対象を純音 (f_s Hz とする) が卓越した定常音場に限定する。音場にトレーサ粒子を散布し、光シートを f_L Hz で点滅させて照射すると、トレーサ粒子はストロボ効果によって見かけ上 $f_A = |f_s - f_L|$ Hz で振動する (図 1)。この振動を撮影するためにカメラに必要な最小のフレームレートは $2f_A$ fps である。撮影された画像を解析することで得られる速度ベクトルは音による空気振動と気流の合成値であるが、気流を定常な直流成分と見做せる場合、測定結果を時間軸上でフーリエ変換し f_A Hz 成分を取り出すことで、粒子速度の振幅と位相の空間的な分布を得ることができる。

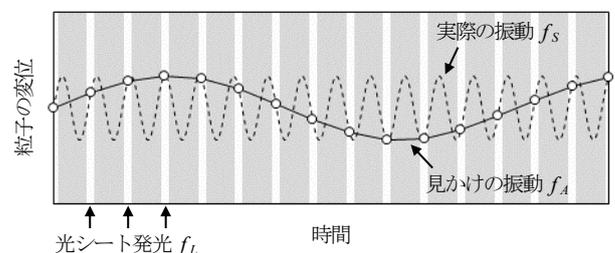


図 1 ストロボ効果概念図

*1 戸田建設株式会社技術開発センター 修士 (工学)

*2 戸田建設株式会社技術開発センター

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng.

Research and Development Center, TODA CORPORATION

3. 検証実験

3.1 測定対象音場

提案手法の有効性を検証するために音響管を用いて実験を行う。使用する音響管は、1,370×150×150 mm の直方体の内部空間を有する、透明アクリル製の矩形管である。管端の一方にスピーカユニット（8Ω，最大出力 80 W）を取り付け、121 Hz の純音を出力することで管内に 1 次モードを励起する。音響管の他端には騒音計を設置し、内部の音圧レベルを測定する。音響管内部にはトレーサ粒子として線香の煙を封入し、管軸に並行に光シートを照射した状態で音響管の中央近傍をビデオカメラで撮影する。このとき光源の前面でスリット入りの円盤を回転させることで光シートを 120 Hz で点滅させ、見かけの周波数を 1 Hz とする。スリット部の開口率は 10% であり、光シートの照射時間は全時間中の約 10%（デューティ比 0.1）である。実験の模式図を図 2 に、実験状況を写真 1 に示す。

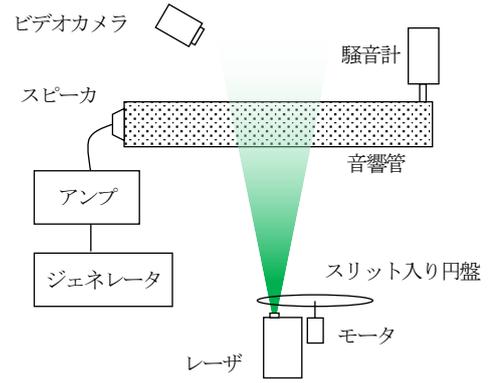


図 2 実験模式図

3.2 PIV 測定条件

PIV で用いられた測定条件を表 1 に示す。今回は撮影対象領域を音響管中央近傍の幅 200 mm の範囲とした。また画像解析ではサブピクセル補間を行い測定精度の向上を試みている。PIV による流速測定に於いて考慮すべき項目のひとつに流体の流れに対するトレーサ粒子の追従性がある。Hjelmfelt-Mockros によると流体に対する粒子の振幅比 η および位相遅れ β は次式で表される⁴⁾。

$$\eta = \sqrt{(1 + f_1)^2 + f_2^2} \quad (1)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{f_2}{1 + f_1} \right) \quad (2)$$

$$f_1 = \frac{\left\{ 1 + \frac{9}{\sqrt{2}(s + 1/2)} N_s \right\} \left(\frac{1 - s}{s + 1/2} \right)}{\frac{81}{(s + 1/2)^2} \left(2N_s^2 + \frac{N_s}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left\{ 1 + \frac{9}{\sqrt{2}(s + 1/2)} N_s \right\}^2} \quad (3)$$

$$f_2 = \frac{\frac{9(1 - s)}{(s + 1/2)^2} \left(2N_s^2 + \frac{N_s}{\sqrt{2}} \right)}{\frac{81}{(s + 1/2)^2} \left(2N_s^2 + \frac{N_s}{\sqrt{2}} \right)^2 + \left\{ 1 + \frac{9}{\sqrt{2}(s + 1/2)} N_s \right\}^2} \quad (4)$$

$$s = \frac{\rho_p}{\rho_f} \quad (5)$$

$$N_s = \sqrt{\frac{v}{\omega d^2}} \quad (6)$$

ここで

ρ_p, ρ_f : トレーサ粒子および流体の密度

v : 流体の動粘性係数

ω : 角速度

d : 粒子径

である。線香の煙粒子の密度を 300 kg/m³、粒子径を 1 - 5 μm とし⁵⁾、空気振動に対する追従性を計算すると、121 Hz の振動に対する振幅比は 0.99 以上、位相遅れは 0.05°未満となる。このことから線香の煙は対象音場に於いて十分な追従性を有しているといえる。



写真 1 実験状況

表 1 PIV 測定条件

カメラ	FDR-AX60
フレームレート	30 fps
露光時間	1/30 秒
撮影対象領域	200×112.5 mm ²
画像サイズ	3840×2160 ピクセル
測定時間	100 秒
レーザー	PIV Laser G4000 (4W)
トレーサ粒子	線香の煙
解析	Python OpenPIV Library
ソフトウェア	v.0.20.9
検査領域	32×32 ピクセル
探査領域	64×64 ピクセル
解析手法	FFT 相互相関法

3.3 実験結果

PIV では撮影領域内の格子点に於ける速度ベクトルが求まるが、以下に示すベクトル分布ではベクトルを縦横それぞれ 1/3 に間引くとともに、管軸方向成分の大きさに応じてスピーカから遠ざかる方向を赤く、近づく方向を青く表示する。またカメラの画像取り込み方式の性質上、得られたベクトル分布は上端と下端で最大 1/30 秒の時間的なずれを有している（動体歪み）。フーリエ変換後の粒子速度分布であれば、このずれは各点での位相を調整することである程度の補正が可能であるが、本報で示す結果はいずれも補正を行っていない。

(1) 粒子画像と画像解析

図 3（上）はスピーカ停止状態で撮影された粒子画像と、そこから得られた流速分析結果の一例（瞬時値）である。粒子画像には光シートの厚みによる濃淡の他に煙粒子の拡散過程で生じた模様が見られる。管内の気流を安定させるために測定は煙の封入後 1 時間以上の間隔を空けて行われたが、図 3（下）流速分布からは管内で空気が対流していることがわかる。

(2) 粒子速度の抽出

図 4 は管内に 124 dB の音圧が生じるようにスピーカから信号を出力した際の、画像中央に於ける速度ベクトルの管軸方向成分の時間波形と、100 秒間の測定値をフーリエ変換することで求めた 1 Hz 成分である。測定値は振動中心が正方向にずれており、直流成分の気流が存在することがわかる。また気流の時間変動や光源およびカメラのジッタ、画像解析の精度等に起因すると思われるランダムな変動（ノイズ）も含まれている。図 5 は画像中央での時間波形 2048 サンプルによる振幅スペクトルであり、1 Hz に明瞭なピークを有している。図 6 は各点での 100 秒間の測定値から求めた 1 Hz 成分について、画像中央での管軸方向成分の位相を $0, \pi/2, \pi \text{ rad}$ としたと

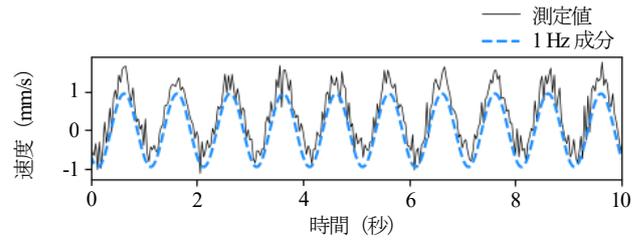


図 4 測定値管軸方向流成分の時間波形

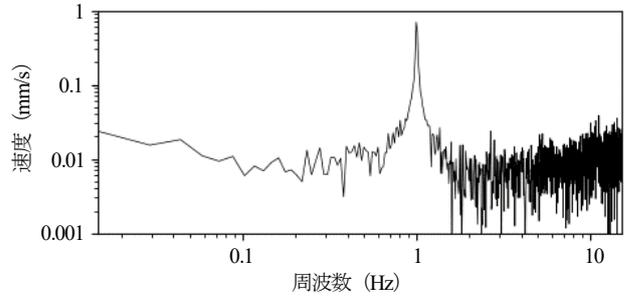


図 5 管軸方向成分の振幅スペクトル

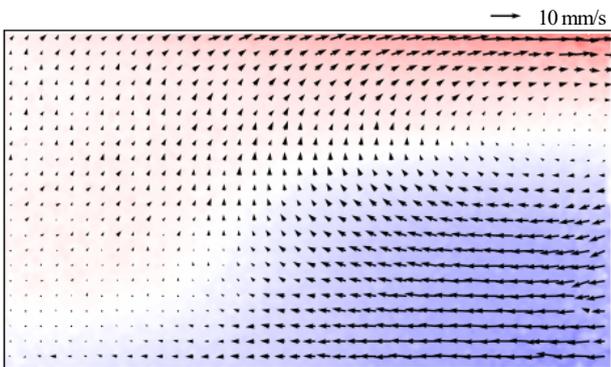
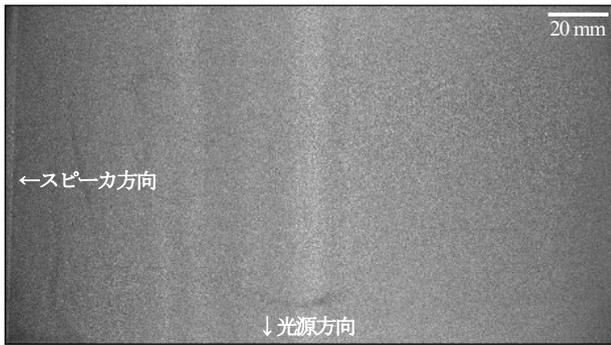


図 3 スピーカ停止時粒子画像（上）および流速分布（下）

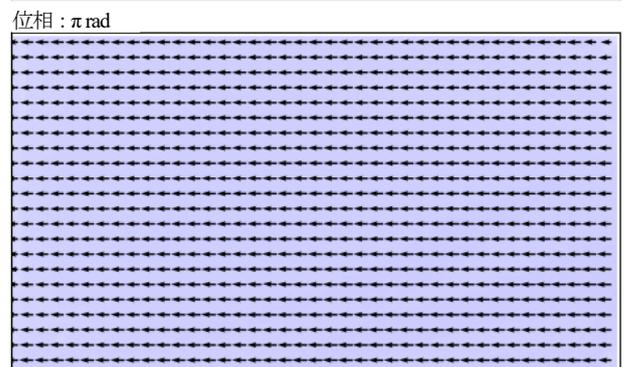
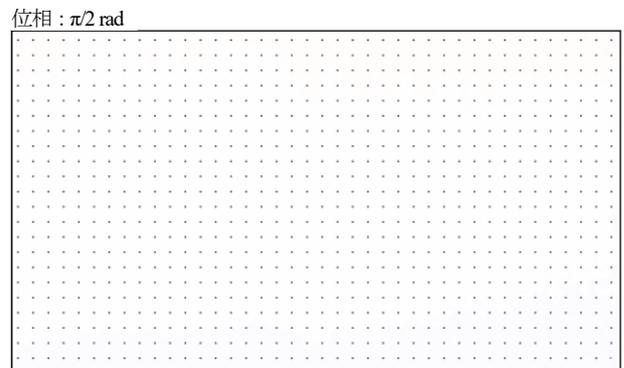
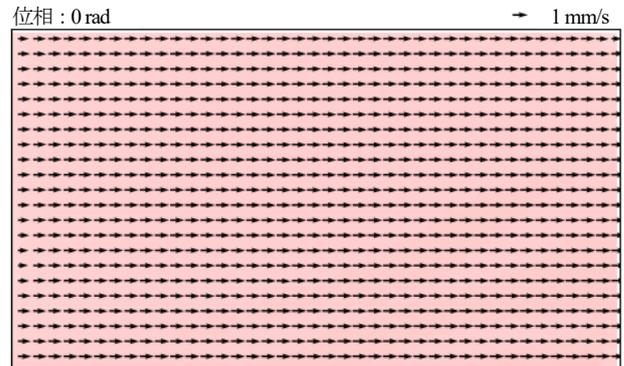


図 6 速度ベクトル 1 Hz 成分分布

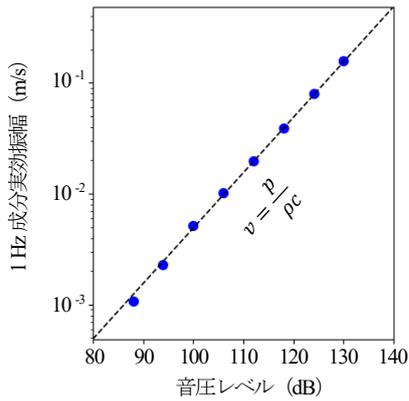


図7 管内音圧レベルと1Hz成分振幅実効値

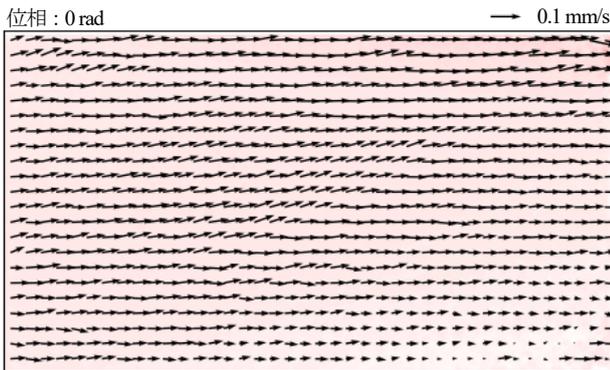


図8 100 dB入力時の1 Hz成分分布

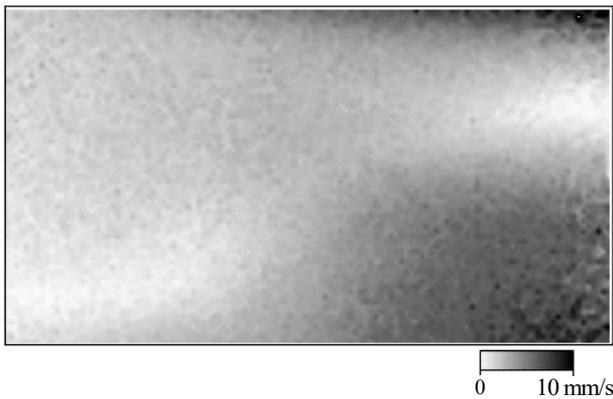


図9 スピーカ停止時の流速の大きさ(上) および1 Hz成分振幅(下)

きの分布を平面上に再配置した結果である。撮影対象領域全体で振幅、位相が揃っていることから、音響管内で生じている1次モードの、中央付近での粒子速度を正しく測定できていると考えられる。

(3) S/N と測定下限値

図7に示すのは管内の音圧を6 dB刻みで変化させた際の、画像中央での管軸方向1 Hz成分の実効値である。ただし音圧から推定される粒子速度(破線)と比較するため、測定値に121を乗じることでストロボ効果を補正している。測定結果は概ね破線上に位置しており100 dB以下の出力に対しても粒子速度が良い精度で測定できているように見える。ところが100 dB出力時の1 Hz成分の分布(図8)を見るとベクトルの大きさと向きが不揃いになっており、音による空気振動が正しく測定できていないことがわかる。図9はスピーカ停止時の流速の大きさと、そのときの1 Hz成分の振幅である。両者が似た分布を有していることから、測定結果に混入するノイズは気流の大きさに影響を受けている可能性が高い。

今回の実験条件で粒子速度の測定下限値を決定しているのは主に気流に起因するノイズと粒子速度の関係であり、カメラの空間分解能と粒子の振幅の関係ではないため、S/Nを改善することができればさらに広い領域を測定できる可能性がある。一例としては、本報では見かけの周波数を1 Hzに固定して測定を行ったが、その値を大きくすることで見かけの粒子速度も大きくなることからS/Nの改善が期待できる。その場合、画面上端と下端での位相のずれが増加するため、適切な方法で補正を行う必要があるだろう。

4. おわりに

純音が卓越した定常音場に於ける、ストロボ効果を利用したPIVによる音場計測の有効性を検証するため、音響管による実験を行い以下の知見を得た。

- ・ 大きな画素数を有するカメラを使用することで幅200 mmの領域の粒子画像を撮影し、音による空気の振動を含む速度ベクトルの時間、空間的な分布を測定できた。
- ・ S/Nを確保できる場合、測定結果をフーリエ変換して得られる粒子速度は音圧から推定される粒子速度とよく一致した。
- ・ 測定下限値を決定するノイズの大きさには気流の速度が影響している可能性がある。

今後の課題としては撮影範囲や見かけの周波数に関する検討の他、対象音の周波数次第では今回のように光シートの点滅周期をカメラのフレームレートの整数倍に調節できない場合も考えられるため、画像のフリッカー(ちらつき)が測定に与える影響を調べることも必要であろう。また今回測定対象としたような密閉空間ではなく、室内空間での測定が実現すれば応用の幅が大きく広がると考えられることから、今後はそのような室内空間での測定を目指し測定手法の改善を試みたい。

参考文献

- 1) 武岡 他 「高速カメラを用いたPIV法による音場収録」, 2010年春季音響学会講演論文集, p.1451-1452, 2010.3
- 2) S. Weyna and W. Mickiewicz, Phase-Locked Particle Image Velocimetry Visualization of the Sound Field at the Outlet of a Circular Tube, Acta Physica Polonica, 125-4-A, p108-112, 2014.4
- 3) 吉村 藤原 川北 「気柱管内に発生する音響定常波の可視化 -定常波に於ける振幅と音圧の状態検証とレーザーによる可視化-」, 可視化情報, 27-2, p111-114, 2007.9
- 4) 可視化情報学会編 PIVハンドブック, 森北出版, p30-31, 2002.7
- 5) 佐野 太田 「炭素性煙霧体に関するコロイド科学的研究-線香の煙」愛媛工業大研究報告(10), p69-72, 1975.3