HPIV による三次元密度・流速分布同時測定法の開発*

(第1報, ホログラム同時記録/分離再生の検討)

池田 耕^{*1}, 班目 春樹^{*2}, 岡本 孝司^{*2}

Measurement of 3D Density and Velocity Distribution using HPIV (1st Report, Evaluation of Simultaneous Recording and Filtering Extraction)

Koh IKEDA, Haruki MADARAME and Koji OKAMOTO

In this study, the simultaneous measurement technique for three-dimensional density and three-dimensional velocity distributions was evaluated. The Holographic Particle Image Velocimetry (HPIV) was the technique to record the three-dimensional position of the tracer particle on the hologram. When there were density distributions in the interrogation region, the plane optical wave may be modulated because of the difference of the refraction indices. Then, both of the plane wave modulated by density and the spherical wave by particle scatter were interfered with the reference beam, being recorded on the single hologram. With reconstructing the hologram, the both of the modulated plane wave and spherical wave were reconstructed. Since the plane wave and spherical wave belong to low and high spacial frequency, respectively, the plane wave was reconstructed with the low-pass filter, resulting in the information of the density distributions to be obtained. With the high-pass filter, the particle three-dimensional positions were determined, i. e., the same procedure with the original HPIV technique. The effectiveness of the proposed technique (Filtering Extraction: FX) was confirmed through the Helium-Jet experiment. The information of the density and velocity were separately measured.

Key Words: Optical Measurement, Flow Visualization, Laser-aided Diagnostics, Hologram, Interferometer, HPIV

1. 諸 言

密度もしくは温度こう配のある場における乱流構造の解明は工学の重要な課題である。例えば新形原子炉として注目されている高温ガス炉の事故時におけるヘリウムと空気が相互作用を行う流れ場などにおいて重要である。このような流れ場においては、大きな密度変化が存在するため、等密度場に比べて複雑な流れ場となる。これは密度こう配によるエネルギー輸送の変化や音速の違い、物質拡散等、密度分布と速度分布の相互作用があるためである。また、密度分布、速度分布ともに非等方的であることから、三次元的な相互作用を考慮する必要がある。三次元空間における詳細な三次元密度、三次元流速分布を知ることができれば、このような密度/流速の三次元的な相互作用を把握することができる。これらの情報は、密度こう配のある流れ場のモデル化や、解析コードの検証などに用いることができるため、重要なデータとなる。しかしなが

ら、空間的な密度および速度分布を同時に計測するための手法はほとんどない。

Yano ら⁽¹⁾ は、レーザライトシートと干渉計を組合せたトリプルパルス法により、流速と密度の同時計測を提案している。レーザライトシートのダブルパルスにより粒子情報を記録するとともに、3 番めのパルスを流れがない状態で照明する。ダブルパルスによる粒子像から流速分布が計測され、ダブルパルス時と第3パルス時の光の位相変化から密度分布を計測する。しかし、この手法で得られる速度、密度分布ともに二次元分布であり、三次元分布計測への拡張は困難である。

Dracos ら⁽²⁾ は、レーザライトシートを用いた LIF (Laser Induced Fluorescent) により三次元濃度/流速分布を同時に計測する手法を提案している。この手法では、シート光によって、二次元断面における流体の濃度分布が LIF により計測される。このシート光を前後に走査することで、二次元断面の濃度分布を積層し三次元濃度分布が求まる。この三次元濃度分布の時間変化から、三次元流速分布を算出する手法である。ただし、この手法はシュミット数 $Sc \gg 10$ において適用可能な手法であり、シュミット数が小さくなるような気体への適用は不適當である。また、レーザライト

* 原稿受付 1998 年 4 月 20 日。

*¹ 正員, 東京大学大学院 (〒319-1106 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-22)。*² 正員, 東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設。

E-mail: koh@tokai.t.u-tokyo.ac.jp

シートの走査に時間が掛かるため、瞬時情報ではなく、速い現象をとらえることはできない。

本研究では、ヘリウムと空気により形成される流れ場を計測対象とし、三次元流速分布計測手法である Holographic Particle Image Velocimetry (HPIV) と三次元密度計測手法である Optical Tomography (OT) を組合せる手法を提案する。

HPIV は、三次元空間における三次元流速分布を計測する手法として、近年研究されている手法である^{(3)~(7)}。この手法は、三次元空間中における多量のトレーサ粒子のある瞬間における三次元位置情報をホログラムに記録し、その粒子の移動を追跡することで流速分布を算出する手法である。粒子の移動を知る必要があるため、微小時間間隔の2時刻においてレーザを照射し、同一のホログラムに2時刻の情報を記録する。このため、一般にダブルパルスレーザが使われる。トレーサ粒子の移動を追跡することから、粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry)の一種であるが、三次元情報を記録する点が拡張されている。なお、三次元位置情報のうち、奥行き方向の位置精度は他の2方向に比べて格段に悪くなるという問題がある。Barnhalt ら⁽⁸⁾は、2方向の情報を同時に記録することで、奥行き方向精度の劣化を補完している。HPIV 法は、ある瞬間の三次元空間の1000000点(100^3)における三次元流速情報を得ることができるという特徴をもっており、現在、各国で開発が進められている。ホログラムの記録方法により、インライン形⁽⁴⁾⁽⁷⁾、オフアキス形⁽³⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾に分類される。

一方、OT(光学トモグラフィ)は、流体の屈折率変化による光の位相シフトを利用する⁽⁹⁾。密度分布のある流れ場にコヒーレントな光を照射すると密度分布に起因する屈折率分布によって、コヒーレントな光が変調を受ける。これを、干渉じまとしてホログラムに記録することによって、光路に沿った密度変化の積分値を得ることができる。OT 法は、多方向から同時に記録された干渉じま情報から、逆問題を解いて三次元密度分布を算出する手法である。干渉じまによる密度分布記録は古くから実施されているが、精度のよい三次元分布を再構築するためには、多数の方向から同時に干渉じまを記録する必要がある。このため、光学系が複雑となるという問題点があった。しかし、近年、逆問題を解くためのコンピュータ手法の発達によって、少ない方向からデータによる高精度再構築手法が提案されている⁽⁹⁾。これらの手法を適用することで、少ない方向のホログラムデータから精度のよい三次元情報を得ることが可能になる。

この2種類の手法は、利用するデータが光のコヒーレンス情報を用いることで共通である。ここで、光のコヒーレンス情報が、位相、振幅ともにホログラムに記録可能であることに着目すると、密度分布のある流れに微小粒子を混入した場をレーザにより照射すると、微小粒子の位置情報と密度分布情報の双方を重畳してホログラムに記録することができる。2種類の情報は、相互に影響を受けあうが、これを分離して情報抽出ができれば、密度と流速の同時計測が可能となる。そこで、本研究では、HPIV 手法と OT 手法を組合せ、三次元流速分布と密度分布を同時に計測する手法、Filtering Extraction(FX)法を提案する。

2. Filtering Extraction 法

2.1 記録手法 本研究で提案する Filtering Extraction(FX)法における光学系の概要を図1に示す。オフアキス形 HPIV 法と、OT 法のホログラフィック干渉系を組合せた光学系となる。なお、HPIV 法の奥行き方向の精度劣化を補完すること、および、OT 法による三次元密度分布再構築を行うことから、FX 法においては2方向もしくは3方向から対象物体を照明し、ホログラムを作成する。図1においては、この2方向もしくは3方向の照射体系のうち1方向のみの照射体系を取り出して示している。

対象領域を通過する物体光と、対象領域外を通過する参照光を角度 θ で干渉させ、ホログラムを記録する。通常、オフアキス形ホログラムにおいては、物体を照明した平行光はノイズ源になるため不要である。しかし、本手法では、密度分布のホログラムを作成するために、あえて物体光を重ねて記録し、再生時

Fig. 1 Hologram recording configuration in FX method

に分離することによりノイズの問題を克服しているところが特徴的である。

HPIV 法では微小間隔の2時刻 (t_0, t_1) においてレーザを照射する。FX 法においても、同様に2時刻の情報を同一のホログラムに記録するが、参照光の方向を2時刻で変えることにより、2時刻を分離する。図1において、参照光の方向が2種類書かれているのはこのことを現している。

撮影対象物として、密度分布をもつ透明な流体中に粒子を混入した場を考える。物体光、参照光ともに円形のコヒーレントな平行光で、径方向、進行方向に強度分布は一樣と仮定する。座標系としては物体光の進行方向に沿って z 軸を取り、物体光の径方向を r 軸とする円筒座標系を用いる。対象物における屈折率分布を $n(z, r, \phi)$ とおき、粒子径 d の粒子が位置 (z_p, r_p, ϕ_p) に存在すると仮定する。

対象物を波長 λ 、強度 A_0 の物体光 O_{p0} で照射する。物体光は密度変化に起因する屈折率分布に従い変調を受け、対象を通過後の平行光束 O_p は以下のような分布をもつ。

$$O_p(z, r, \phi) = A_0 \exp \left(\frac{2\pi i \int_{-\infty}^z n(z', r, \phi) dz'}{\lambda} \right) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし i は虚数単位である。

また粒子により、Mie の散乱式に従う散乱光 O_s が生ずる。今、粒子の大きさを、数 μm 程度とすると、散乱光の強度が強い部分は比較的立体角が小さい。屈折率分布のこう配が比較的微小と仮定し、屈折率分布により変調される成分も考慮して、散乱光 O_s は以下の式で近似できる。

$$O_s(z, r, \phi) = A_0 J_1 \left(\frac{\pi i R}{2 Z} \right) \times \exp \left\{ \frac{2\pi i}{\lambda} \left(\int_{z_p}^z n(z', r, \phi) dz' + R^2/4 Z \right) \right\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 Z, R はそれぞれ遠近パラメータ、規格化された動径であり以下の式で表される。

$$Z = \lambda(z - z_p)/d^2$$

$$R = 2\sqrt{r^2 + r_p^2 - rr_p \cos(\phi - \phi_p)}$$

この式は屈折率分布がない場における散乱の式が位相シフトしただけであるので、この分布によるホログラムは密度場のない場合と同様の有効性をもつ。

これら2種の光が混在した物体光 $O_s + O_p$ を物体光に対し角度 θ をもった参照光 P_θ と干渉させる場合を考える。このときの強度分布は

$$I^2 = O_p^2 + O_s^2 + P_\theta^2 + P_\theta O_p + P_\theta^* O_p$$

Fig. 2 Reconstruction of the hologram

$$+ P_\theta O_s + P_\theta^* O_s + O_p O_s + O_p^* O_s + \delta \quad \dots\dots (3)$$

となる。ここで、 δ は多重散乱等の影響による誤差とする。この強度分布を写真感板に記録、現像し、ホログラムとする。このホログラムに、図2に示すように、参照光に共役な光 P_θ^* を照射することで、ホログラムが回折格子として働き、撮影時の光が再生される。式(3)の第1~3項は干渉項ではなく、また第8, 9項は再生される主方向が元の物体光の方向ではない。図2に示される、元の物体光方向に再生される光は第4~7項のみである。第4, 5項は変調された平行光 O_p による干渉項であり、この項によって再生される光は式(1)の観察面の屈折率分布による位相シフトを保った光が再生される。また、第6, 7項は粒子散乱光 O_s によるホログラムであり、再生光は同様に式(2)の方向と位相シフトを保った光が再生される。

よって、元の物体光方向に再生される光は、粒子の散乱光情報と屈折率分布情報の両方の情報である。これらの再生光は、同一の軸上に再生されるので、互いに干渉しあい、互いのデータに対しノイズとなる。特に粒子の散乱光強度は比較的弱いので、平行光のノイズの影響を強く受ける。これらのことから、同時に再生される2種の光を分離することが必要となる。それぞれの光を分離することができれば、あとは、通常のHPIV法およびOT法を適用することで、三次元流速、密度情報を再構築することができる。

本手法 (Filtered Extraction) では、この分離再生の手段として、空間周波数の違いに注目し、フィルタリング処理を行うことで分離することを試みる。

2.2 分離再生手法 参照光と位相共役な光 P_θ^* によって、物体光の方向に再生された光のうち、粒子像情報をもった光は収束光束 (拡散光) として再生され、屈折率分布情報をもった光は平行光束として再生されている。このように平行光と収束光 (拡散光) が混在した場において両者を分離する手法として、レンズを使用したスペーシャルフィルタの応用がある。スペ

Fig. 3 Spatial filter in the reconstruction

イシャルフィルタは入射光が単レンズによりフーリエ変換され、入射角により光の結像位置が変化することを利用したフィルタである。図3に光学フィルタの概念図を示す。入射光が平行光の場合には光源の位置が無窮遠であり、変換像は焦点1点に収束する。一方、収束光の場合には、空間周波数はある光源の位置に依存した一定の広がりをもつ。つまり、平行光はフーリエ面において一点に収束し、収束光はフーリエ面において平面の分布をもつ。そこで、焦点位置にピンスポットを置くことにより粒子画像の高次成分のみを取り出すことが可能である。また焦点にピンホールを設置することにより粒子画像の成分の大半を削除することが可能であり、平行光成分のみを取り出すことが可能になる。前者のフィルタを光学的ハイパスフィルタ[図3(a)], 後者を光学的ローパスフィルタ[図3(b)]と呼ぶ。フィルタにより分離された光は同じ仕様の単レンズにより逆変換を施すことにより個々のデータとして取扱うことができる。

粒子の散乱光によるホログラムは、式(2)により近似的に計算することができ、再生された粒子像を構成する光の立体角は 10° 程度である。この光を効率よくフィルタリングをするためにはフィルタの位置において粒子像を構成する光の広がりがでさうの限り大きいこと、フィルタリングされた光をでさうの限り多く逆変換することが必要である。それゆえ前面のレンズは前焦点が目的の粒子の位置になるように設定する必要がある。また、レンズは焦点距離が長くかつ径が大きいものが必要である。一方平行光束のほうにおいて考慮すべきはピンホール径である。今までの議論では屈折率分布による変調は光路の向きを変更しないとして扱ってきたが、回折限界付近では有意な差として現れる。そこでピンホールとしてはレンズおよび変換前の

平行光束の径より計算されるスポット径より大きめの開口を使用する必要がある。

2.3 屈折率分布の影響 2.2節までは、屈折率分布が比較的小さく、個々の画像に対する影響が少ないと仮定していた。特に、粒子像については、記録時には屈折率分布により変調を受けた光が記録されるが、再生時は屈折率分布がないため焦点がぼけ、再生位置が変化する。光線は屈折率分布のこの配に従い屈折する。

空气中に直径20 mmの純ヘリウムが存在する場合中の粒子を考える。前述のように、計算より得られる散乱光強度のうち十分な強度をもつ立体角は 10° 以下である。また、ヘリウムと空気の屈折率の差はおよそ 0.233×10^{-3} である。このことから計算を行うと、端部の粒子を除いて、位置の誤差は平面方向で $10 \mu\text{m}$ 程度、奥行き方向で $100 \mu\text{m}$ 程度である。通常のHPIVにおいて、粒子の三次元位置の精度は、奥行き方向については粒径の数十倍、平面方向については粒径の数倍程度であることを考慮すると、ほとんどの場所で、密度分布による位置の変化は、誤差の範囲内に収まる。また、実際の流れ場では、ヘリウムの拡散が大きく、屈折率こう配は比較的緩やかであることを加味すれば、実用上は問題がない。

3. 検証実験

本研究で提案するFX法により、三次元粒子位置と密度分布に起因する屈折率分布を同時記録するとともに、分離再生できることが原理的に示された。本章では、実験によりFX法の実現可能性を検討する。

3.1 流速および密度分布記録 本手法の実現可能性および、有効性を示すために実験を行った。実際の計測においては、2方向もしくは3方向からのレーザ光を同時に照射しホログラムを作成する。本研究では、FX法の実現可能性を確認することが目的であるため、一方向からの光により対象を照射した。このため、得られる流速分布において、奥行き方向の精度は非常に悪くなる。また、得られる密度分布も二次元情報となる。本実験を通じて、粒子情報よりノズル近傍における二次元流速分布を求め、また、干渉じま情報より二次元密度分布を求め、FX法の実現可能性を検証する。

図4に示すヘリウム上昇噴流を対象として、実験により流速および密度の記録を行った。空气中に上向きに内径5 mmの円形ノズルから平均粒径 $30 \mu\text{m}$ 、密度 0.02 g/cm^3 の粒子を混入した純粋なヘリウムを 5 l/min で噴出する。手法の有効性を検証するためには

Fig. 4 Schematic of the experimental setup

単純な流れであるほうが望ましいため、ヘリウムは密度差による重力の上向き方向の加速を考慮し、噴流は上向きに一定流量で噴出させた。計測対象領域は、ノズル出口を含む 30 mm 程度の領域である。

ホログラム記録用光源として、インゼクションシーダ付きの Nd:YAG パルスレーザーの倍波 ($\lambda=532$ nm) を用いた。2 時刻の粒子像を記録するため、100 mJ/10 ns レーザを 2 本使用する。なお、2 本のレーザー光は、ハーモニックジェネレータの前で光路を合せ、参照光の方向は 2 時刻で共通としている。実際には、2 時刻で参照光方向を分ける必要があるが、本研究においては検証を行うことが目的であることと、光学系を簡便にすることを目的として、一方向の参照光を用いた。2 本のレーザーパルスの間隔は自由に設定できるが、平均流入流速 (~ 6 m/s) および画像上の移動距離を考慮し 55 μ s に設定した。

図 1 に示す FX 法の光学系に従いホログラムの撮影を実施する。レーザー光は参照光と物体光に分けられ、それぞれおよそ径 60 mm の平行光束となる。物体光はノズルの上部およそ 2 mm を含み、重力方向に対し垂直に交わるように設定した。撮影領域から感板までの距離は 90 mm に設定した。参照光は物体光に対し 30° になるように入射し、感材上でホログラムを作成した。ホログラムは専用のデベロッパを用いて位相ホログラムとして現像を行った。このホログラムには、粒子の位置情報とヘリウム分布に起因する屈折率分布情報の 2 種類の情報が記録されている。このホログラムから、流速と密度情報を分離再生する。

3・2 流速測定 図 3(a) に示す再生光学系によって粒子像を抽出する。再生光としては記録時と同じ波長の半導体励起連続発振 Nd:YAG Laser ($\lambda=532$ nm) を使用した。撮影時の参照光に対して位相共役な光を再生光として入射する。参照光が平行光である

ため、位相共役光も平行光となる。そこで、再生光を平行光とし、撮影時と同様に、ホログラム感板の法線方向に対し 30° の角度で入射する。ハイスパフィルタ用のレンズシステムとしては、径 100 mm, $f=400$ mm のものを使用した。またハイスパフィルタの平行光をストップするピンスポットには直径 1 mm の鉄製ストップを使用した。

フーリエ面で直径 1 mm となる散乱角は式 (2) により計算される強度を用いると、ちょうど一次の粒子干渉じま程度の角度である。このことから二次以上の干渉じまによる粒子像をハイスパフィルタによって再生することができる。なお、本再生においては直径 10 mm のローパスフィルタも併用し、バンドパスフィルタリングを行った。これは、式 (2) より、直径 10 mm に相当する空間周波数以上の高周波成分は粒子像再生にほとんど寄与しないためである。また、このフィルタリングによって、ホログラム感板上のごみなどによる高周波成分ノイズを除去することもできる。

また、2 章で考察したように、フィルタによる粒子像再生効率をよくするため、再生粒子像がちょうど前面レンズの焦点位置に来るようにレンズシステムを設置した。これらの粒子像は後面レンズの焦点位置近傍に再生される。このフィルタリングされた粒子画像はデジタルビデオカメラ (Sony DCR-VX 1000) により撮影する。なお、近接撮影レンズを用い、カメラの視野を 4 mm に設定した。

なお、ホログラム感板を、X-Y 2 軸移動形のステージ上に設置し、マイクロメータにより移動させることにより、再生する粒子像の x - y 座標 (カメラ撮像面平行方向) をコントロールする。奥行き方向 z については、デジタルカメラを一軸移動ステージに設置し、カメラ本体を移動させることにより撮影される奥行き方向の領域を 0.1 mm 単位で制御した。なお、使用した粒子径が 30 μ m と比較的大きなものであったため、再生画像が奥行き 1 mm 程度のボリュームをもち、奥行き方向の位置精度は非常に悪くなった。

図 5 にフィルタリングにより撮影された粒子像の一例を示す。図は識別しやすいように、強度の反転を行ったものを示す。フィルタリングによって、粒子像の強度は弱くなるが、集光点近傍では粒子像がはっきりととらえられている。集光点から奥行き (z) 方向にカメラを移動することにより、粒子像はぼけていき、対応する奥行き位置に存在する他の粒子に対して焦点が合ってくる。しかし、粒子の濃度をさらに上げた場合、または粒子の径をさらに微小にした場合を考慮するとノイズレベルに対して信号レベルがさらに弱くなるこ

Fig. 5 Example of particle image extracted by high-pass filter

Fig. 6 Two-dimensional velocity distribution at nozzle center

とが考えられる。フィルタリング手法はさらなる改良を必要とし、Meng らによる IROV⁽⁷⁾ 等のフィルタリング手法も考慮に入れるべきである。

なお、本実験では、参照光の方向を二つのパルスで同一としているため、2時刻の粒子像が同時に再生されている。よって、これらの画像データから自己相関によってこの再生断面における二次元断面内の二次元流速分布を求めた。図6にノズル出口近傍の二次元流速分布の例を示す。なお、自己相関であるためベクトルの方向は決定できない。しかし、鉛直上方噴流であることを考慮し、ベクトル方向は上向きとなるようにプロットしている。

得られた流速は平均して 7 m/s 程度であり、流量から計算されるノズルでの初速がおおよそ 6.6 m/s であることを考慮すると比較的良好な値であり、FX 法による流速分布取得の可能性が示された。本来の FX 法では、参照光の方向を2時刻で分けることにより2時刻の分離を行う。また、複数の方向から撮影を行い、精度の落ちる奥行き方向の位置精度を補完することによって三次元流速を算出する。撮影光学系の改良、三次

Fig. 7 Interferogram image extracted by low-pass filter

元粒子位置の自動取得、三次元相関手法の開発は今後の課題である。

3.3 密度分布測定 図3(b)に示すローパスフィルタを用いて密度分布情報を再生した。粒子再生光学系と同じく、再生光としては半導体励起連続発振 Nd: YAG Laser ($\lambda=532$ nm) を使用した。ローパスフィルタとして、直径 1 mm のピンホールを用いた。フィルタリングされた平行光は、対象中の密度分布情報を保持している。ここで、この密度分布情報を可視化するために、他の平行光と干渉させる。密度分布により変調された光と、変調されていない光の干渉によって干渉じまが生成され、その干渉じまを記録することにより密度分布情報が得られる。

図7に本実験で得られた干渉じまを示す。干渉じま一つが、1波長分の変調を現している。ノズルよりヘリウムが噴出し、拡散しているようすがよく見てとれる。実験における粒子密度はおおよそ 10 個/mm³ 程度であり、この程度の粒子濃度である場合には干渉画像の分離は比較的容易である。これは粒子の強度が比較的弱いことと、ローパスフィルタが機能しているものと考えられる。

なお、グラッドストーン数 K を用いると、密度 ρ の気体による屈折率 n は以下のように表される。

$$n = 1 + K\rho \dots\dots\dots (4)$$

ノズル出口において、直径 5 mm のモル分率 100% ヘリウムが円筒状に存在しているとし、空気屈折率を 1 とし、ヘリウムの $K=0.196$ cm³/g および光の波長 533 nm を考慮して理論的に求められる光の位相差は、干渉じま約 2.2 本分となる。得られた画像のノズル出口における干渉じまの本数は 2.5 本めの暗線と 2 本めの明線の境界付近であることより、干渉じまの本数は 2.2 本付近であり、本手法における密度計測の妥当性

Fig. 8 Three-dimensional density distribution around nozzle exit

を示している。

噴流の密度分布を回転対称であると仮定し、最大エントロピー法を適用し、三次元屈折率分布に変換をし、式(4)を用いて密度分布に変換を行い、さらにモル分率分布に変換し図8に示すような、各断面におけるモル分率分布が得られる。ヘリウムの拡散が定量的にとらえられている。

本実験においては干渉画像を一方向のみから撮影しているため、得られる密度分布は二次元情報である。FX法においては2方向もしくは3方向からデータを撮影することで周方向の情報を増大させ、三次元分布を算出する。

多数の方向からの情報を元に逆問題を解いて三次元分布を出す手法はCT(Computer Tomography)として確立されている。しかし、FX法においては、光学系のレイアウトが制限を受けるため、増やせる方向は2方向ないし4方向である。少ない方向からの情報を元に三次元分布の再構築を行うアルゴリズムはいくつか提案されているが必ずしも十分な精度であるとはいえない⁽⁹⁾。そこで今後の課題としては、少ない光学系による多方向計測体系の実現、および限定された方向からの情報より三次元再構築を行うアルゴリズムの

改良があげられる。

4. 結 言

密度場中の流体の三次元密度と三次元流速分布の測定手法である Filtered Extraction(FX)法を考案し、原理について考察を行い実現可能性を示唆した。この手法は、オフアキシス形 HPIV 法と OT 法のホログラフィック干渉系を組合せた手法であり、瞬時の三次元流速と密度情報を同一のホログラムに記録する。さらに、この情報をフィルタを用いて別々に再生し、それぞれの情報から三次元情報を取り出すものである。本手法を単純な密度こう配をもつ流れに適用することにより、二次元であるが密度および流速分布を取得することができた。このことから本手法を拡張し三次元計測の実現可能性を示した。

文 献

- (1) Yano, M., Simultaneous Measurement of Velocity and Density, *Flow Visualiz.*, III(1983), 145-149.
- (2) Dracos, T. A., Merkel, G. J., Rys, F., Rys, P., Maas, H. G. and Gruen, A. W., Velocity Field Measurement Using Laser Induced Fluorescence Tomography, *Proc. PIV Fukui*, (1995), 7-15.
- (3) Barnhart, D. H., Adrian, R. J. and Papen, G. C., Phase-Conjugate Holographic System for High-Resolution Particle Image Velocimetry, *Appl. Opt.*, **33**-30 (1994), 7159-7170.
- (4) Meng, H. and Hussain, F., Holographic Particle Velocimetry: a 3D Measurement Technique for Vortex Interactions, Coherent Structures and Turbulence *Fluid Dyn. Res.*, **8** (1991), 33-52.
- (5) Zhang, J. and Katz, J., Off-Axis HPIV with Forward Light Scattering from Particles, *FED*, ASME, **191** (1994), 173-177.
- (6) Ovrn, B. and Hovenac, E. A., Coherent Forward Scattering Particle Image Velocimetry: Application of Poisson's Spot for Velocity Measurement in Fluids, *SPIE*, **2005** (1993), 338-348.
- (7) Meng, H. and Hussain, F.: In-Line Recording and Off-Axis Viewing Technique for Holographic Particle Velocimetry, *Appl. Opt.*, **34**-11 (1995), 1827-1840.
- (8) Hesselink, L., *Optical Tomography Hand book of Flow Visualization*, (1989), 307-329, Hemisphere pub.
- (9) Dean Verhoeven Limited-Data Computed Tomography Algorithms for the Physical Science, *Appl. Opt.*, **32**-20 (1993), 3736-3754.