

論文の内容の要旨

論文題目：ホログラムによる密度噴流の 定量可視化技術開発

Development of three-dimensional quantitative visualization technique
using hologram, for jet with density variation

氏名：池田 耕

密度分布を持つ流れ場は密度分布と流れ場の相互作用がおこるため、往々にして複雑な非常に複雑な流動を生じる。このような流動の詳細な情報を得るためには、空間的に精度の高い定量計測手法が必要になってくる。そこで、近年盛んに研究されはじめた手法が可視化画像を用いることによる各種物理量の定量的空間計測である。

流体の3次元密度情報、流速情報の高精細可視化技術には現在それぞれホログラフィック干渉計を用いた optical tomography(OT) 法、Holographic Particle Image Velocimetry(HPIV) 手法が盛んに研究されているが、その両者とも非常に複雑な手続きを持ち、容易に適用することが困難である。一方で、3次元の密度流速情報を同時に計測する手法は現在ほとんど存在しておらず、新たに開発される必要がある。

そこで本論では以下の3点について議論を行なった

- 簡易な実時間計測が可能なホログラフィック干渉計を用いた OT 法の開発を行なう。
- HPIV 手法の手続きの簡略化を目指す。
- HPIV 手法と OT 手法を組み合わせた新たな3次元流速及び密度の同時計測手法を提案する。

実時間ホログラフィー干渉計は、撮影時と計測時にホログラムが移動してはいけないため、通常のホログラム感材を使用する場合特殊な現像装置を用意するか、職人的再セッティングの技量が必要となる。しかし、近年熱プラスチックホログラフィーの分野において進展がなされ、光導電プラスチックホログラフィーという技術が開発され、同手法を用いることにより、熱歪みや現像時のホログラフィーの移動が不要になり簡易に実時間ホログラフィー干渉系を実現可能になった。本論では PPH を用いた実時間ホログラフィー干渉計を he-air 置換現象に適用することにより、その有効性を示した。

HPIV 手法は手続きとしては3種の手続き、粒子像の撮影、粒子像の再生及び3次元位置の取り込み、3次元位置からの流速の計算からなる。再生時の3次元粒子位置の取り込みに付いて考える。通常の HPIV は位

相共役再生を用い実像再生を行ない拡大率の大きなレンズを用いることにより粒子位置の正確さを追求している。しかし位相共役再生を用いた場合再生参照光学系を別途用意する必要があるため、例えば再生光学系と記録光学系の間に1mrad 角度ずれを起こした場合を考えると、ホログラムと対象の距離が20cmであった場合、200 μ m 程度のずれを生じることになる。このような誤差を減らすために粒子位置のキャリブレーション手続きが非常に複雑になる。

ここで、実像ではなく虚像を使用した場合を考えると難点はS/N比と拡大率にある。また、利点としてキャリブレーションの容易さがあげられる。そこで垂直噴流に同手法を適用することにより虚像再生 HPIV の有用性を示した。

図1に虚像再生粒子位置から計算を行った流速分布の一部を示す。計算された流速の平均は平面位置の誤差を加味し、 4.4 ± 0.14 m/s となる。さまざまな計測上の要因を考慮すると流量から計算した平均流速 3.7 m/s に対し、若干大きい 4.4 m/s は妥当な値である。

3次元の流速分布及び密度(温度)分布を同時計測する手法である Filtering Extraction 法 (FX 法) を提案した。HPIV 手法、OT 手法は共に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。そこで、記録時には分離を行わず再生時に分離を行なうことが可能であれば同時計測手法が開発できることになる。

FX 法ではフアクシス型 HPIV 法と、OT 法のホログラフィック干渉系を組み合わせた光学系となる。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。

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、粒子像情報を持った光は収束光束(拡散光)として再生され、屈折率分布情報を持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イシャルフィルタの応用がある。レンズを透過した焦点面で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持つ。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(図2(a))。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(図2(b)) 本手法を空气中に上向きに内径 5mm の円形ノズルから純粋なヘリウムに適用し可能性を探った。

図3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。集光点近傍で粒子像がはっきりととらえられていることが分かる。得られた画像データから自己相関によって2次元流速分布を求めた(図4)。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。

図5に本実験で得られた干渉縞を示す。ノズル出口において、理論的に求められる光の位相差は、干渉縞約 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縞の本数は 2.5 本目の暗線と 2 本目の明線の境界付近であることより、干渉縞の本数は 2.2 本付近であり、本手法における密度計測の妥当性をしめしている。また、最大エントロピー法を適用することにより図6に示すような、各断面におけるモル分率分布が得られる。

本論では密度噴流の乱流構造の定量可視化測定法を開発するために以下の3種の計測手法について調査、提案を行った。

- Photoconductor plastic Hologram 装置を用いた実時間 OT 手法
- 虚像再生を用いた簡易 HPIV 手法
- Filtering Extraction 法を用いた3次元密度流速分布同時計測

その結果3種の計測全てにおいてよい結果を得ることが出来た。よって、さらに理想的な計測方法に向かって着実に一歩先に進むことができた。

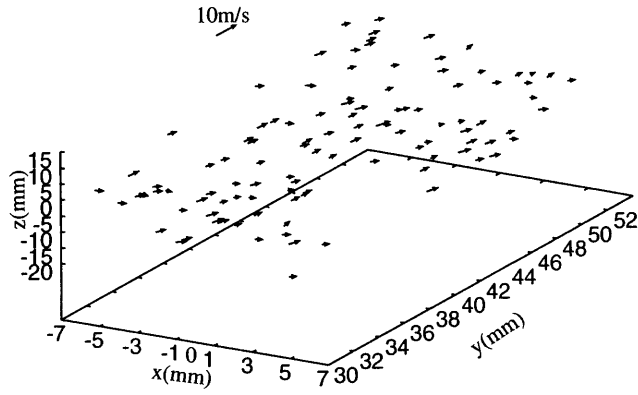


图 1: Calculated 3 dimensional Vector

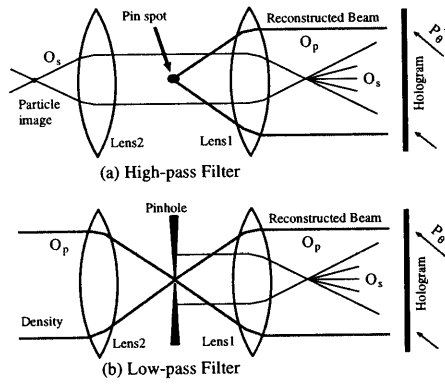


图 2: Spatial filter in the reconstruction

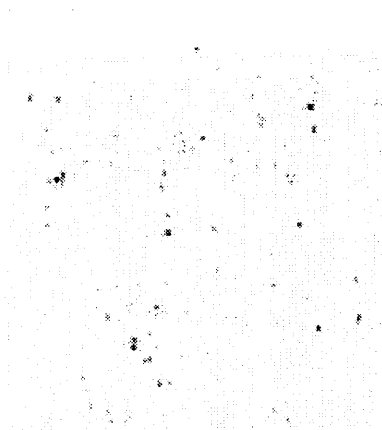


图 3: Example of particle image extracted by high-pass filter

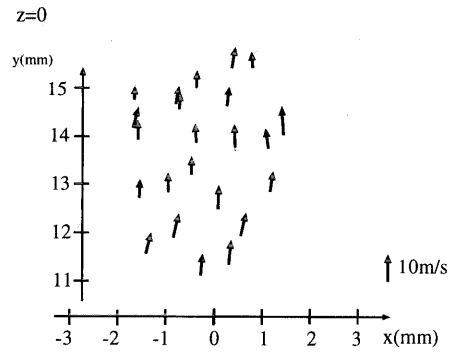


图 4: Two-dimensional velocity distribution at nozzle center

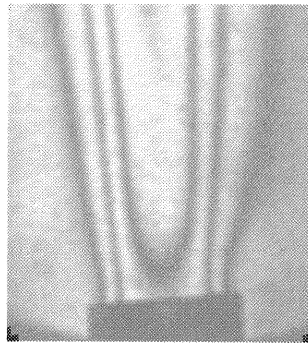


图 5: Interferogram image extracted by low-pass filter

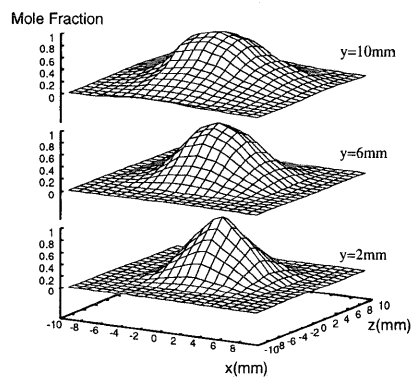


图 6: Three-dimensional density distribution around nozzle exit