

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560202

研究課題名(和文) マイクロデジタルホログラフィックPTVによる3次元速度・温度同時計測

研究課題名(英文) Three-dimensional simultaneous measurements of velocity and temperature field via micro-digital holographic PTV

研究代表者

佐竹 信一 (SATAKE SHINICHI)

東京理科大学・基礎工学部・准教授

研究者番号：90286667

研究成果の概要(和文)：デジタルホログラムを用いた三次元流体計測法に、LIF法を組み合わせた三次元温度計測法を付加することにより、三次元速度・温度計測が可能な系を構築することが目的である。まずLIF法に必要な蛍光粒子の選定を行い、三次元粒子位置・温度同時計測法の原理実証を行った

研究成果の概要(英文)：This study reports on a new technology of simultaneous measurements of micro-fluorescent-particle position in 3-D and of temperature field with high time-resolution. The technology to measure both velocity and temperature field is based on the simultaneity of micro digital holographic particle tracking velocimetry (micro-DHPTV) and laser-induced fluorescence (LIF).

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・熱工学

キーワード：マイクロ・ナノスケール伝熱

1. 研究開始当初の背景

近年、画像機器の発達に伴い、デジタル画像処理を応用した流体計測が広く行われるようになってきた。Adrianは、画像処理に基づく流速計(粒子画像流速計,PIV)を、粒子群の移動距離から局所流速を求める狭義のPIV(Particle Image Velocimetry)、各トレーサ粒子を追跡して流速を求めるPTV(Particle Tracking Velocimetry)などに分類している。いずれも、非接触測定のため

流れ場を乱さず、平面あるいは空間内の多点の情報が同時に得られるなどの利点を持つ。自然界や産業界で現れる流れや、それに伴う熱・物質の輸送現象は、空間的な広がりを持った渦構造に支配されることが多く、これらの画像計測手法がもたらす情報は、物理的メカニズムの解明、数値予測モデルの開発、人為的な制御手法の構築などに極めて重要であり、近年はこの計測法のマイクロ系への適用が行われている。複雑な流路内の流れの解析

するためには三次元で流れを見る必要がある。三次元への適用としてはステレオ画像の原理を用いた方法、デフォーカスを用いた方法、ホログラムの原理を用いた方法等が考案されている。ステレオ画像を用いた方法は複数台のカメラを用いて同時に撮影を行い、ステレオ写真の原理に基づいて各カメラの画像からトレーサ粒子の三次元座標を決定する方法である。またデフォーカスを用いた方法は焦点より一定距離ずれたトレーサ粒子の画像をそれぞれ記録し、その画像を用いて奥行き方向を計算する手法である。ホログラムを用いた方法は、ホログラムを記録したプレートにレーザー光をあて、ホログラムを直接 CCD に記録し、計算機上でホログラムを再生する DHPTV(Digital Holographic Particle Tracking Velocimetry) という手法である。DHPTV 及びデフォーカスを用いた PTV では単眼で三次元の流れを計測することができる。

一方、原子力プラント内の熱流動現象の解明および予測、自動車及び列車の車室内の温熱環境下や住環境下における快適性を向上させるために、各々の条件下で生じる伝熱、熱及び物質拡散、音、燃焼などを含む熱流動場の精密な測定、予測が必要とされてきた。温度と速度の同時計測に関しては、感温液晶懸濁粒子法の可視化画像に相関法を適用した二次元の測定例があるが、液晶は呈色温度範囲が狭く測定精度が低い。また、PIV とレーザー誘起蛍光法(LIF) を組み合わせることで精度の高い二次元同時計測を行った例や、佐藤らのスキャニングレーザを用いた擬似的な三次元の同時計測例も報告されている。温度と速度を同時に、かつ空間的にも三次元的に測定する計測手法としては二宮らの開発した三次元温度速度同時計測能を有したトレーサ粒子を用いたステレオ画像を用いた手

法が報告されている。しかしながら、この方法も 2 台のカメラで 3 次元の速度を求めるため、温度場も含めると 3 台以上のカメラが必要となる。したがって、3 次元で温度場と速度場を同時に少ない台数のカメラで取る場合は、速度場はホログラムでとることを考える。通常ホログラムは、再生に時間がかかるとされてきたが、研究代表者は、並列技術、専用計算機技術、PC グリッド技術を駆使して MPI 版、FPGA 版、PC グリッド版の 3 種類の高速ホログラム再生プログラムを完成させた。したがって、温度の解析時間が加わっても十分実用レベルにあると判断した。温度場の計測には蛍光粒子をわざとデフォーカスさせるデフォーカス法を用いる。この方法は通常上述のとおりマイクロスケールの 3 次元の速度を求めるのに用いられるが本研究では、この蛍光でフォーカシングに温度の情報をを持たせることを考えた。同時に蛍光粒子励起用のグリーンにより粒子から回折されてできるホログラムで 3 次元速度を得る。これにより時間方向の計測を含めたマイクロスケール 4 次元速度・温度同時計測を行う。

2. 研究の目的

デジタルホログラムを用いた三次元流体計測法に、LIF 法を組み合わせた三次元温度計測法を付加することにより、三次元速度・温度計測が可能な系を構築することが目的である

3. 研究の方法

本研究室で開発したデジタルホログラム三次元流速計(4)を元に 2 台カメラ計測系を考案した。この計測系を図 1 に示す。この系ではグリーンレーザー(527[nm])を用いて蛍光粒子を励起し、蛍光を発生させる。97%透過、3%反射のスプリットミラーを用いることで蛍光およびグリーンレーザーを 2 つに分割す

る。Camera1ではHPF(575nm)を用いることでレーザーそのものの光を遮断し、励起された蛍光のみを撮影している。Camera2では反射ミラー(97%透過・3%反射)によって、反射されたレーザー光を撮影することで蛍光粒子によって回折されて発生したホログラム像を撮影している。Camera1ではレーザーによって励起された蛍光粒子の蛍光を計測し、Camera2では反射された3%のレーザー光を用いてホログラム画像を撮影している。この装置を用いることで、Camera1で温度を、Camera2で三次元座標を計測することが可能となる。粒子径6 μm の蛍光粒子(KANOMAX, FLUO STAR)をWater jacketにいれ上部と下部からヒータで加熱し温度をコントロールし熱伝対で温度を検出する。Water jacketはトラバース装置⁽⁴⁾に取り付けてありレーザー変位計⁽⁴⁾により奥行き方向を測ることができる。

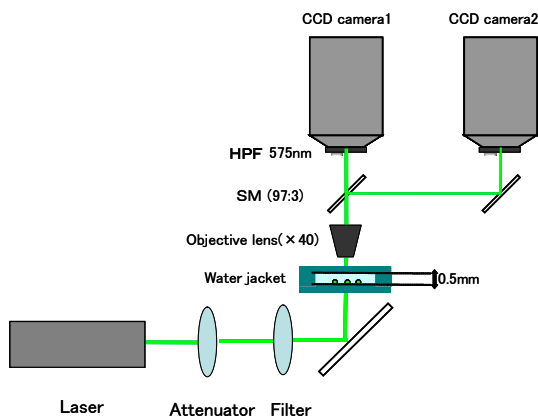


図1 Experimental apparatus.

4. 研究成果

温度を10 $^{\circ}\text{C}$ 刻みで20 $^{\circ}\text{C}$ から40 $^{\circ}\text{C}$ まで変化させた。また、奥行き方向については0 $[\mu\text{m}]$ から20 $[\mu\text{m}]$ まで5 $[\mu\text{m}]$ 刻みでトラバースした。測定結果について以下の図に示す。図2に0 $[\mu\text{m}]$ におけるCamera1とCamera2の像を示す。

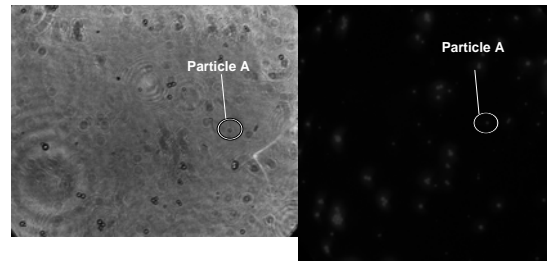


図2 Particle images by each Camera: (a) Hologram fringe by Camera 2, (b) fluorescent image by Camera 1.

A点については20 $^{\circ}\text{C}$ の時について各奥行き距離でホログラム再生を行い、移動距離を導出した。図3に結果をまとめる。また、A点について $z=0[\mu\text{m}]$ における各温度で輝度値を計測し、その結果を図4に示す。以上結果より、2台カメラを用いて蛍光とホログラムを同時に撮影できることが示された。また、片側のカメラで撮影したホログラム画像から奥行き距離が導出できることも確認できた。今回の撮影では温度を20-40 $^{\circ}\text{C}$ まで10 $^{\circ}\text{C}$ 刻みで変化させた。また、各温度において z 方向距離を0 $[\mu\text{m}]$ から20 $[\mu\text{m}]$ まで5 $[\mu\text{m}]$ 間隔で変化させた。これにより15箇所の粒子の蛍光輝度値と温度、粒子の奥行き方向の情報を得ることができた。しかし、これでは温度、奥行き方向の座標、輝度値の関係式のグラフを作成するにはプロット点が少ないので、各温度に対して線形補間、0 $[\mu\text{m}]$ から20 $[\mu\text{m}]$ まで5 $[\mu\text{m}]$ 刻みの5点から0 $[\mu\text{m}]$ から20 $[\mu\text{m}]$ まで1 $[\mu\text{m}]$ 刻みの21点に増やした。次に各トラバース量において温度を10刻みで20 $^{\circ}\text{C}$ から40 $^{\circ}\text{C}$ であったものを1 $^{\circ}\text{C}$ 刻みの3点から21点へと増やした。この処理をすることで15点から21 \times 21へと増やした。これによって温度、奥行き方向の座標、輝度値の関係式のグラフ図5を作成することができた。この温度と座標平面関数を用いればホログラムによる高さ Z を与えればその高

さの温度分布が得られることになる。

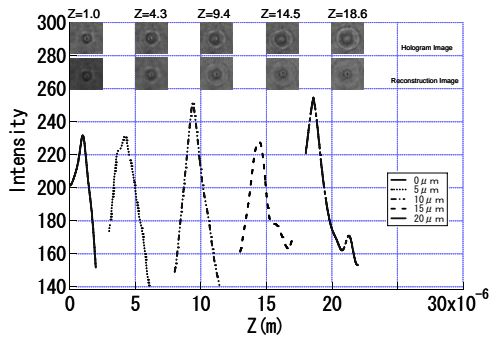


図3 Intensity distribution at the z-direction, Hologram image, and reconstruction image on the particle A.

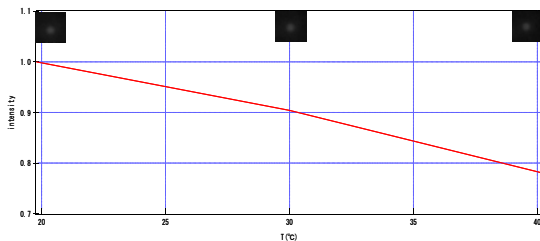


図4 Temperature distribution and intensity.

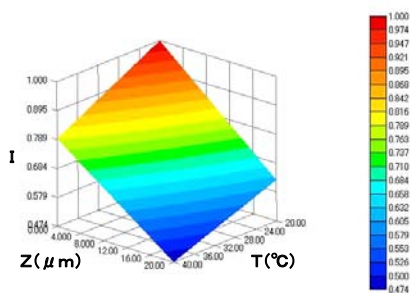


図5 Intensity distribution at z-direction and temperature

2台のカメラとデジタルホログラム技術を援用し、片側のカメラでホログラム、もう一方のカメラで蛍光像を撮影することによりマイクロ領域における3次元粒子位置・温度同時計測が可能なことを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

① 佐竹 信一、金井 高弘、米本幸弘、海野徳幸、谷口 淳," ナノインプリントにおけるUV 硬化樹脂の温度依存性に関する研究,"日本機械学会熱工学コンファレンス 2009 講演論文集, 山口大学工学部、宇部, PP. 219-220.

② 佐竹 信一、安楽 隆史、多本史彦、佐藤一穂、功刀資彰," デジタルホログラムによる3次元速度・温度同時計測,"日本機械学会熱工学コンファレンス 2010 講演論文集, 長岡技術科学大学、長岡, PP. 269-270.

③ Shin-ichi Satake, Takafumi Anraku, Fumihiko Tamoto, Kazuho Sato, Tomoaki Kunugi," Three-dimensional simultaneous measurements of micro-fluorescent-particle position and temperature field via digital Hologram," Microelectronic Engineering, (2011), doi:10.1016/j.mee.2010.12.033 査読有

〔学会発表〕(計3件)

① 佐竹 信一、金井 高弘、米本幸弘、海野徳幸、谷口 淳," ナノインプリントにおけるUV 硬化樹脂の温度依存性に関する研究,"日本機械学会熱工学コンファレンス 2009, 2009.11.7-8, 山口大学工学部、宇部

② Shin-ichi Satake, Takafumi Anraku, Fumihiko Tamoto, Kazuho Sato, Tomoaki Kunugi," Three-dimensional simultaneous measurements of micro-fluorescent-particle position and temperature field via digital Hologram," Proc. of the 36th International Conference on Micro and Nano Engineering, Genoa, Italy, 19-22 September (2010), P-LIFE-66.

③ 佐竹 信一、安楽 隆史、多本史彦、佐藤一穂、功刀資彰," デジタルホログラムによる3次元速度・温度同時計測,"日本機械学会熱工学コンファレンス 2010, 2010.10.30-31, 長岡技術科学大学、長岡

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐竹 信一 (SATAKE SHINICHI)

東京理科大学・基礎工学部・准教授

研究者番号：90286667