

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 19 日現在

機関番号：13501

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760131

研究課題名(和文) 2色LIF法を用いた気体の高精度3次元温度・速度分布計測システムの開発

研究課題名(英文) Temperature and Velocity Measurement of Air Flow Combined with Two-Color LIF

研究代表者

船谷 俊平 (FUNATANI, Shumpei)

山梨大学・総合研究部・助教

研究者番号：50607588

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：2色LIF法による温水の温度分布計測技術を応用し、蛍光染料を雰囲気中に噴霧し、これを可視化計測することで、気体の温度分布の非接触多点計測を行う方法を提案した。また、レーザー光とスキャニングミラーを用いたW型スキャニング法を確立し、気流の3次元温度、速度同時計測システムを開発した。この計測手法を実際の気流(垂直浮力噴流)に対して適用したところ、周囲流との混合による噴流の温度低下、周囲流体の巻き込みといった現象がみられ、こうした浮力噴流の傾向は過去の研究の結果とも一致したことから、本計測手法の有効性が示された。

研究成果の概要(英文)：This study proposes a two-color laser-induced fluorescence technique for measuring the temperature distribution of an airflow by spraying a mist of a fluorescent dye. The mist is generated by using propylene glycol, the vapor pressure of which is much lower than that of water, as the solvent of the fluorescent dyes. A supersonic moisture chamber is used as the atomizer for seeding the tracer particles to be visualized. A three-dimensional particle image velocimetry (PIV) method using W-shaped light sheet and color PIV with a digital SLR camera was also developed. The spatial resolution of the z-direction has much room for improvement by increasing the number of cameras. The proposed technique was applied to the measurement of the temperature and velocity distribution in a thermal vertical buoyant plume. The proposed technique was found to be very effective for the study of such a thermal structure, and it is well suited for measuring the temperature and velocity field of an airflow.

研究分野：可視化計測

キーワード：可視化 PIV LIF 速度計測 温度計測

1. 研究開始当初の背景

気体の雰囲気温度を非接触多点計測する技術に対しては、産業界からの要請が特に強い。例えば、熱交換器等の設計において熱流体シミュレーションを行う際、実機での実験結果とシミュレーション結果を比較し、シミュレーションの妥当性を確認することが必要となるが、熱電対を挿入するなどの方法では同時計測できる実験点数に限りがあるため、平均温度、温度変動といった基本的な物理量の比較を行うことはできるものの、乱流により引き起こされる渦や、慣性力と浮力が相互に影響しあう複雑な伝熱現象を比較、検証することができない。機器の設計においては、熱交換器を大きくする、流速を上げるなど、安全裕度を高く見積もるといった対策を実施できる場合もあるが、筐体サイズ、流体騒音などの制約から、こうした回避策を採用できない事が多い。そのため、気体の温度分布の非接触多点計測に対するニーズは大きい。

気体の温度分布計測に関する過去の研究では、雰囲気中に微量の NO を添加し、これにレーザーを照射してその蛍光波長分布から温度を算出する NO-LIF 法が知られているが、気体の温度計測精度は数十 K 程度と大きい。これは多数の波長の蛍光輝度を分光分析するという計測手法の特徴に起因するもので、計測精度の向上は相当困難と考えられる。また、光源、撮影装置が高価であり、費用対効果の観点から同計測法の産業界への普及は限定的である。その他、CO₂ の赤外線吸収率が温度依存性を持つことを利用した温度計測手法も知られているが、雰囲気中の CO₂ 濃度が数 % 程度存在する条件でのみ計測可能となるため、既にその程度の CO₂ が存在する環境(燃焼場など)での利用に限られる。

一方、水槽中の温水に対しては、2 色 L I F 法を適用した温度場・速度場同時計測法が知られている。この計測法は、温度依存性の異なるローダミン系蛍光染料を組み合わせることで、可視化に用いる光源の強度ムラによる蛍光強度の非一様性の影響を打ち消し、可視化画像の S/N 比を高めることができ、画像処理手法の向上による温度計測精度の高精度化の余地が大きい。

2 次元空間内の気体・液体の速度分布を可視化計測する手法としては、2 次元 PIV 法が確立されており、産業界においても幅広く用いられている。また、3 次元空間内の速度分布計測に拡張する応用的手法としてはトモグラフィック PIV 法が提案されている。しかし、この計測法では、計測領域全体に入射光を当て、複数台のカメラを用いて得られた撮影画像を比較照合することで計測領域内の粒子移動量の 3 次元分布を得ており、可視化画像には計測領域の手前から奥までのトレーサー粒子が全部映り込むことから過誤ベクトルが生じやすいという問題がある。一方、2 次元 PIV 法に用いるライトシートを 2 組用

いて各々を面外方向へスキャンさせながら可視化画像を時々刻々得て、各々の撮影画像より得られた 2 次元速度分布を 3 次元再構成することで、流体速度の 3 次元 3 成分 (3D-3C) 分布を得る手法もある。しかしながら、この手法では過誤ベクトルは生じにくいという利点があるものの、流速に対して十分短いスキャン時間で多数の可視化断面を撮影する必要があるため、スキャン方向の空間解像度に限界があるという欠点を有している。そこで本研究では、レーザービームを W 型に 2 回スキャンさせることで、3 次元的に変形された可視化断面を得て、1 組の可視化画像により 3 次元空間内の速度分布を一度に計測する手法を開発に取り組み。なお、この手法では可視化断面を変形させることによる計測精度、空間解像度への影響について詳しく評価する必要がある。また、本計測法では、時間解像度がスキャン速度に制約されるため、時間差を与えた 2 色または 3 色のレーザービームを用いて 1 組の可視化画像を得ることにより時間解像度を改善する手法を検討する必要がある。そこで、デジタル一眼レフカメラを用いたカラー PIV 計測法の開発も併せて行う。その際、カメラ側の時間制御が比較的容易にできるため、デジタル一眼レフカメラを複数台同期させて計 1 億画素程度の可視化画像を得ることが可能である。これにより、数十～数百断面の可視化画像を瞬時に得て、これを線形補間することで 3 次元速度分布を算出出来ることが期待される。

2. 研究の目的

本研究では、2 色 L I F 法による温水の温度分布計測技術を応用し、蛍光染料を雰囲気中に噴霧し、これを可視化計測することで、気体の温度分布の非接触多点計測を行う方法を提案することとした。また、レーザー光とスキャンミラーを用いた W 型スキャン法を確立し、気流の 3 次元温度、速度同時計測システムを開発することとした。

3. 研究の方法

水の温度分布計測法である 2 色 L I F 法を用いて気流の温度分布計測を行うには、微粒化した蛍光染料のミストを雰囲気中に噴霧し、このミストにレーザーシート光を照射することにより 2 色 L I F 法に必要な可視化画像を取得する方法が考えられる。そこで、2 色 L I F 法に用いられる代表的な蛍光染料 (ローダミン B , ローダミン 1 1 0) の溶液を超音波噴霧器で微粒化し、それをガラス製容器 (400 × 250 × 280) 中の雰囲気中に噴霧する形とした (図 1)。水の温度分布計測では、計測対象となる水を用いて蛍光染料を希釈するが、水のミストは蒸発しやすいため、蛍光染料をエタノールで溶解したうえ、揮発性の低いプロピレングリコールで希釈し、噴霧した。

蛍光染料ミストの粒径は平均 3 μm 程度と

小さく、蛍光強度も弱いので、撮影に用いるカメラは高感度（ISO感度：25600）のデジタル一眼レフカメラとした。なお、デジタルカメラの撮影画像はJPEG形式で保存することが一般的であるが、非可逆圧縮を伴う保存形式では輝度値を正確に保持できないため、RAW形式で保存する必要がある。

レーザー光をシート状に照射する手段としては、シリンドリカルレンズを用いてレーザー光をシート状に変換する光学系が一般的であるが、この場合、レンズ表面のわずかな凹凸、収差、レーザービームの輝度ムラ等がレンズ光学系により拡大され、可視化画像に筋状の様子が映り込む。2色LIF法では、計測原理上入射光強度の強弱による影響は受けないこととなっているが、これは光学系の色収差、色ジミ等を無視できる場合に限られるため、たとえ2色LIF法であっても、入射光の強度分布はできるだけ一様にするのが望ましい。そこで、レーザー光を回転ミラーに照射し、この回転ミラーを±5度の範囲で毎秒100回振動させた。このような手法でレーザー光を走査することにより、シート状の領域にレーザービームを照射した。

2色LIF法に用いる光源を選択する際には、ローダミンBの励起波長域を考慮すると、波長：488nmのAr-ionレーザーを用いることが望ましいが、カラーカメラのR、G画像に2色LIF法を適用する場合、G画像に入射光がわずかに映りこむ影響を考慮する必要がある。特に、本計測では噴霧液滴にレーザー光を入射するため、散乱光の影響が大きいことが懸念される。そこで、入射光源にはAr-ionレーザーよりも低波長のダイオードレーザー（波長：445nm、レーザー出力：1.0W）を用い、G画像への入射光の映り込みを軽減した。

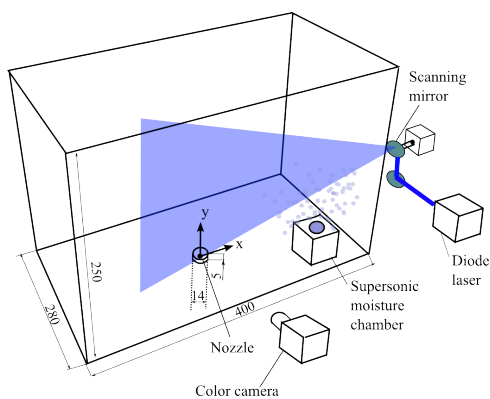


図1 実験装置

また、3次元速度分布計測は以下の手順で行った。本手法では、スキャニングミラーを2枚用いて、レーザービームをx,y方向にスキャンすることで、ライトシート面をW型に変形させた。スキャニング動作のタイミングチャートを図2に示す。これをカメラにて撮影することで、W型に折れ曲がった10断面から

成る可視化画像が得られる。これを2回繰り返して同一断面の可視化画像をもう1組取得し、これらの画像に2次元PIVを適用して、複数断面上での2次元速度分布を得る。この得られた2次元2成分速度分布を3次元空間内に再配置することにより3次元2成分速度分布が得られる。なお、3次元3成分速度分布の計測は、本手法にステレオPIV法を併用することで可能である。

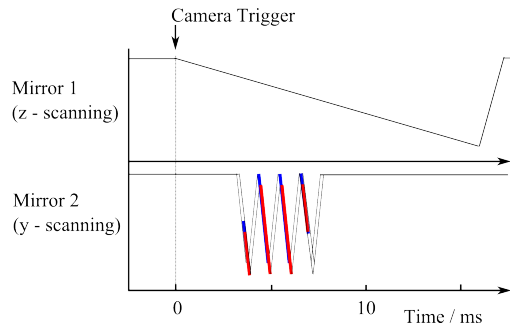


図2 3次元PIV法のタイミングチャート

4. 研究成果

(1) 温度分布計測

図3に、可視化画像の画素の赤色成分Rと緑色成分Gの比R/Gと温度との関係を示す。R/G値は、雰囲気温度に対して単調減少の関係にあることが分かる。これは、水に蛍光染料を溶かした場合と同様であり、蛍光ミストを用いた場合であっても、R、G画像を用いた2色LIF計測法を適用できることを示している。この実験では、容器等の制約から25から35の範囲で温度計測を行ったが、2色LIF計測法による水の温度計測では0から60程度の範囲で温度計測できることが分かっているため、蛍光ミストを用いた気流の温度計測においても同等の温度計測範囲をもつと考えられる。

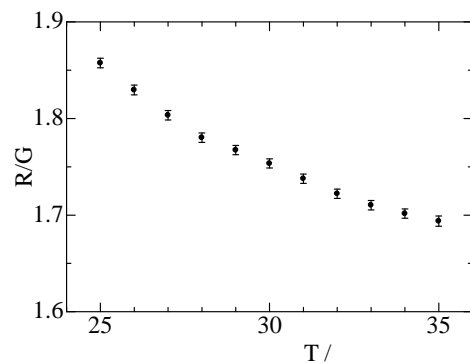


図3 気流温度とR/G値の関係

本計測手法を実際の気流（垂直浮力噴流）に対して適用した結果を図4に示す。この実験では、容器下部に設置した円筒形ノズルより、容器内の雰囲気よりも高温の噴流を発生させ、噴出による慣性力と温度差による浮力の相互作用により生じる浮力噴流の温度分布

を2次元計測した。得られた温度分布では、周囲流の大きな巻き込みは小さく、周囲流との混合による噴流の温度低下は噴流の外側のみで生じている。こうした浮力噴流の傾向は過去の研究の結果とも一致する。

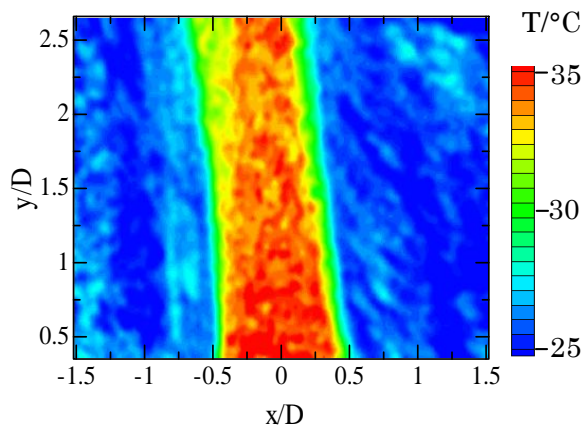


図4 気流温度分布の計測結果の一例

(2) 温度計測の不確かさ解析

本計測手法の不確かさの要因としては、検定用の熱電対による温度測定誤差 (± 0.05 K)、色 - 温度変換の画像処理による誤差、噴霧する蛍光ミストの濃度変動、蛍光ミストの温度追従性などが考えられる。

色 - 温度変換の画像処理による誤差については、実験装置内を一樣温度に保持し、その温度を熱電対で確認したうえで可視化画像を取得し、画像処理の結果得られる温度分布と熱電対により計測された一樣温度との誤差を評価した。その結果、 ± 0.30 Kの計測誤差が得られた。

雰囲気中に噴霧する蛍光ミストは徐々に沈降し、容器の外壁等に付着するため、蛍光ミストの濃度は徐々に減少する。この影響による誤差について評価するため、容器内の温度を 26 に保持した状態で蛍光ミストを噴霧し、計測温度の時間変化を繰り返し評価し、計測温度のばらつきを算出した。その結果、噴霧の 10 分後に温度分布計測を行う場合、 ± 0.41 Kの計測誤差をもつことが分かった。

蛍光ミストの温度追従性の評価は数値解析により行った。本実験に用いた超音波噴霧器では、平均ミスト径 $3\mu\text{m}$ 程度の液滴が生成されることから、粒子径を $1\mu\text{m} \sim 5\mu\text{m}$ 、雰囲気温度とミストの温度差を $2.5\text{K} \sim 40\text{K}$ に変化させ、球座標の一次元非定常熱伝導方程式により解析したところ、表1の結果が得られ、いずれの条件においても 0.1 ミリ秒以下でミスト温度は雰囲気温度に対して 0.01 K 以内に漸近することが分かった。

なお、この評価では流速と粒子移動速度との差により生ずる強制対流熱伝達等の影響を考慮していないが、対流熱伝達の影響は追従性を高める方向に働くため、実際の温度追従

性は更に高いと推察される。

これらの不確かさ要因の評価より、本計測法における温度計測値の 95%信頼区間は ± 0.99 Kであることが分かった。

(3) 速度分布計測

3次元PIVの手法を垂直噴流現象に適用し、3次元速度分布計測を行った結果を図3に示す。計測領域の下部より上方へ向かう上昇流が形成されていることを確認できる。また、従来のPIV法に対して著しく変形したライトシート照射であっても、カメラの被写界深度を十分大きく取ることで、各断面において良好なPIV計測結果を得られることが分かる。

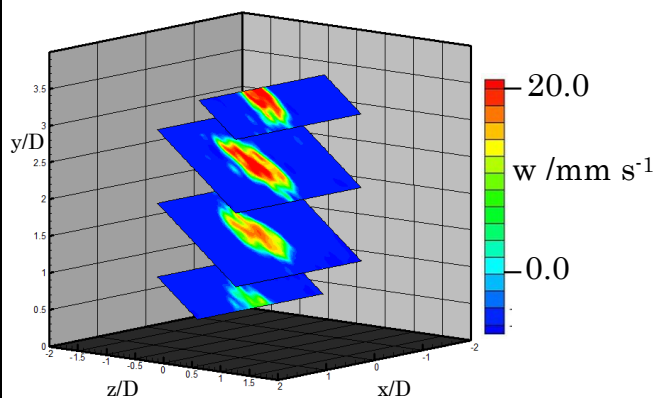


図5 気流速度分布の計測結果の一例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

Funatani, S., Takeda, T. and Toriyama, K.. Velocity Measurement by PIV Using W-Shaped Scanning Light Sheet. Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, Vol.3, No.1, pp.35-39, 査読あり, 2015年.

Funatani, S., Toriyama, K. and Takeda, T. Temperature Measurement of Air Flow Using Fluorescent Mists Combined with Two-Color LIF, Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, Vol.1, No.1, pp.20-23, 査読あり, 2013年.

Funatani, S., Takeda, T. and Toriyama, K., HIGH-RESOLUTION THREE-COLOR PIV TECHNIQUE USING A DIGITAL SLR CAMERA, Journal of Flow Visualization and Image Processing, Vol.20, No.1-2, pp.35-45, 査読あり, 2013年.

〔学会発表〕(計1件)

船谷俊平, 鳥山孝司, 武田哲明, W型ライトシートを用いた3D-3C PIV計測法

の開発,第41回可視化情報シンポジウム,
東京都新宿区・工学院大学,2013年7月
16日

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称:非接触気体速度計測方法及び装置

発明者:船谷俊平

権利者:国立大学法人山梨大学

種類:特許

番号:特開2015-010908

出願年月日:2013年06月28日

国内外の別:国内

〔その他〕

ホームページ等

[http://sangaku.yamanashi.ac.jp/docs/6.%E8%88%A9%E8%B0%B7%20%E4%BF%8A%E5%B9%B3%20%E5%8A%A9%E6%95%99\(%E6%A9%9F%E6%A2%B0\).pdf](http://sangaku.yamanashi.ac.jp/docs/6.%E8%88%A9%E8%B0%B7%20%E4%BF%8A%E5%B9%B3%20%E5%8A%A9%E6%95%99(%E6%A9%9F%E6%A2%B0).pdf)

6. 研究組織

(1)研究代表者

船谷 俊平 (FUNATANI, Shumpei)

山梨大学・大学院総合研究部・助教

研究者番号:50607588