

平成 21年 5月 15日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007～2008
 課題番号：19560164
 研究課題名（和文） 完全3次元温度場・速度場の時系列同時計測法の開発と乱流熱対流の組織構造研究
 研究課題名（英文） Development of Simultaneous Measurement Technique for Three-Dimensional Temperature and Velocity Fields and Its Application to Turbulent Thermal Convection
 研究代表者
 氏 名：藤澤 延行（FUJISAWA NOBUYUKI）
 所 属：新潟大学・自然科学系・教授
 研究者番号：20165369

研究成果の概要：

2色LIF・PIVによる温度場・速度場の同時計測法をノンペネトレーティブ対流へ適用し、乱流の組織構造を明らかにする。また、背景シュリーレン法と代数的再構成法を組み合わせた温度場計測法に3次元相互相関を導入することで3次元温度場・速度場を同時計測する方法を提案し、浮力噴流の3次元温度場・速度場へ適用することでその有効性を検討する。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：流体工学

科研費の分科・細目：機械工学・流体工学

キーワード：乱流、可視化、熱流体計測

1. 研究開始当初の背景

乱流ノンペネトレーティブ対流(水平流体層を下面加熱、上面断熱の条件下で発生する対流現象)の加熱面近傍に形成される組織構造に関する研究は、Sparrow et al.(1970), Willis and Deardorff (1979)による流れの可視化研究に始まるが、その組織構造についての詳しい考察は感温液晶法を用いたKeane et al.(1997)の可視化研究まで待つことになる。そこでは、感温液晶トレーサを用いた温度場

の可視化実験によって、ノンペネトレーティブ対流のスポーク構造線に沿って高温領域が形成され、高温ブルームとして上昇することを定性的に見出した。その後、Fujisawa and Adrian(1999)はスキヤニングライトシート法と感温液晶法を組み合わせた準3次元温度分布の可視化計測によって、自然対流の温度場の定量的評価、さらに、スキヤニングライトシート法と感温液晶ステレオPIV法(Funatani and Fujisawa 2002, Fujisawa,

Funatai and Katoh 2005) による、準3次元温度場・速度場の同時計測が行なわれ、乱流熱対流構造への応用が期待された。しかしながら、現在のところ、ノンペネトレイティブ対流への応用は、実験装置の制限や感温液晶法による温度場計測技術の限界(計測精度、呈色温度域が狭いこと、呈色温度域外の温度エラーの問題)もあり、乱流統計量の評価までは至っていない。また、温度場・速度場の完全3次元同時計測が実現していないことも、乱流熱対流の温度場・速度場の構造研究の進展を遅らせている状況である。

2. 研究の目的

(1) 2色LIF・PIV法による温度場・速度場の同時計測技術を構築して、ノンペネトレイティブ対流の加熱面近傍に形成されるスポーク構造と発生するブルーム構造を定量的に考察する。

(2) 完全3次元温度場・速度場の同時計測技術の新たな提案として、3次元温度場計測法の確立と3次元相関法を組み合わせた手法を考察する。

3. 研究の方法

(1) 乱流ノンペネトレイティブ対流実験

高レイレー数の乱流ノンペネトレイティブ対流実験は、下面加熱、上面断熱の対流実験装置を用いて行った。図1に、本実験装置の概略を示す。実験装置の水平断面は400mm×400mmで、装置の下面は銅製、その

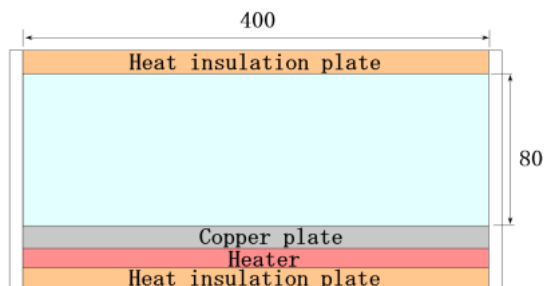


図1 熱対流実験装置

下側にヒーターマットを設けることで交流加熱した。ヒーターマットの下側には、ベークライト板を設けることで下側壁面からの熱損失を小さくした。一方、装置周囲ならびに上側境界は、アクリルで製作し、断熱条件とした。なお、本実験では、流体層の厚さは80mmとした。ここに、フラックスレーリー数は $Raf (= \alpha g Q h^4 / \nu K^2) = 4.8 \times 10^9$ である (α : 体積膨張率, g : 重力加速度, Q : 熱流束, h : 流体層の高さ, K : 温度伝導率, ν : 動粘度)。

乱流ノンペネトレイティブ対流の計測に用いた2色LIF/PIV温度・速度同時計測システムを図2に示す。このシステムは、温度計測のための2台の16ビットCCDカメラ(1280×1020ピクセル)、フィルター、ビームスプリッター、そして、速度計測のための8ビットCCDカメラ(1008×1018ピクセル)からなる。ただし、ここで使用するすべてのカメラはいずれもパルスコントローラで制御されており、得られたデジタル画像はPC内臓のハードディスクに格納できるようになっている。一方、作動流体である水には、蛍光染料としてローダミンB(温度依存性が大)とローダミン110(温度依

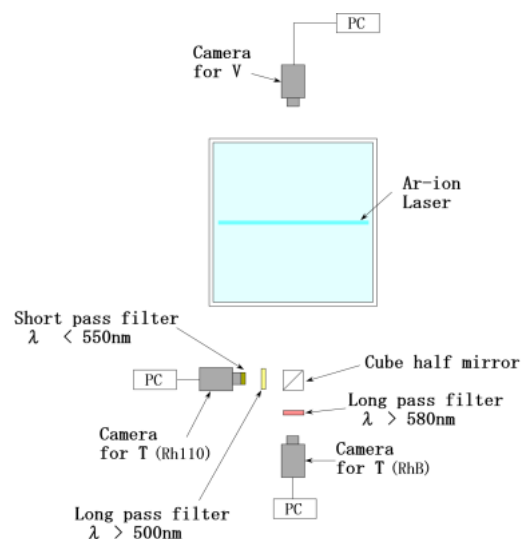


図2 2色LIF・PIVシステム

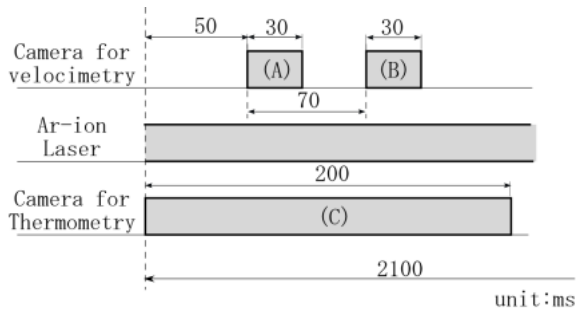


図3 タイミングチャート

存性が小)を一様に溶解した。これらの染料は、アルゴンレーザーによって励起されると、各々600nm、540nm付近の波長を持つ蛍光を発する。本実験の温度計測では、これらの2種の蛍光をビームスプリッターとバンドパスフィルターで分離し、各々の蛍光を16ビットCCDカメラで画像化した。

図3は、温度場・速度場同時計測システムのタイムチャートを示す。本実験ではアルゴンレーザーをシート状にして連続照射し、2台の16ビットカメラのシャッター機能を用いて可視化画像を取得した。ここでは、シャッター時間は200msとした。一方、速度計測用の8ビットカメラでは、フレームストロリング機能を用いることで、温度計測時に対応する2画像を得た。ただし、速度画像の時間間隔は70ms、露光時間は30msである。

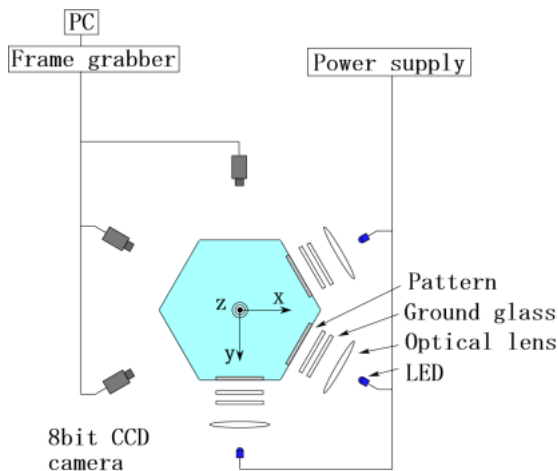


図4 浮かブルーム実験装置と計測システム

(2) 背景シュリーレン法CT法

図4に浮かブルームの実験装置を示す。正六角形断面を有する水槽には水(温度15)が満たされており、その底部に設けた直径10mmの円孔が設けてある。ただし、水槽の対辺距離は400mm、高さは400mmである。円孔には、長さ500mmの直円管を介して恒温水槽に接続されている。恒温水槽には、コントローラ付きヒーターによって 18 ± 0.1 の精度で一定水温に保たれている。恒温水槽にて加熱された温水はテストセクション下部からポンプによって送り出され、浮かブルームとして水槽内に流出する。ただし、本実験の浮かブルームは、断面平均流速10mm/sに設定して実験を行った。したがって、レイノルズ数 $Re(=Ud/\nu)=100$ である。

ブルームの温度場・速度場同時計測には、背景パターンシュリーレン法を3方向から適用して行った。ただし、本実験では、8ビットCCDカメラ(768x492ピクセル)3台を用いた。この計測原理は、対象とする温度場を通して背景パターン(ドットパターン)をカメラと反対側に配置したとき、計測対象の示す温度場によって屈折率変化が発生するが、この方法を複数の方向から適用することで、屈折率分布を3次元再構成する。さらに、屈折率と温度の関係を適用することで、3次元温度分布を計測できる。ただし、この3次元再構成には、MARTと呼ばれる代数的再構成法を適用した。一方、このような3次元温度場が時系列的に得られれば、3次元温度場の微小時間の移動量から3次元速度場を評価することができる。この解析手法として、ここでは3次元画像相関法を用いた。

4. 研究成果

(1) 乱流ノンベネトレイティブ対流実験

図5、図6は、2色LIF・PIV法

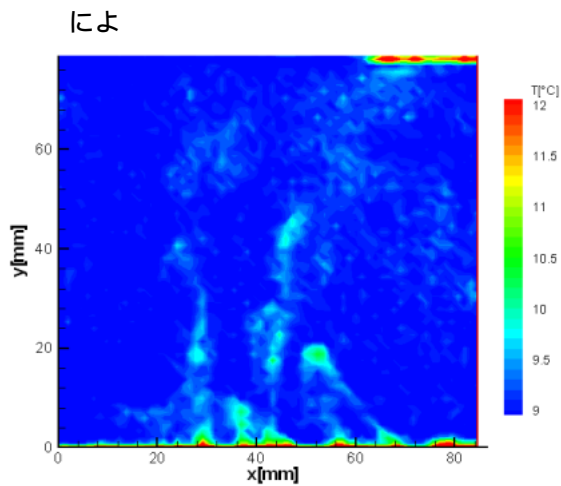


図5 温度場の計測結果

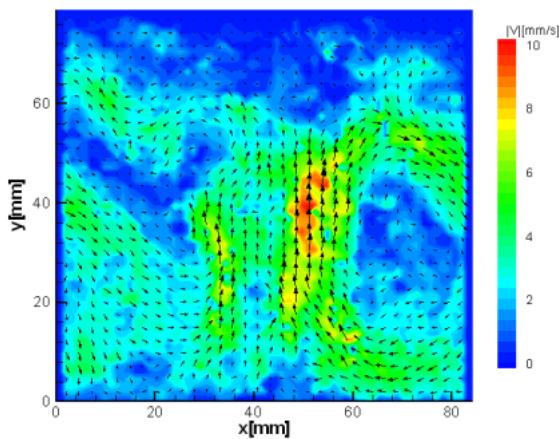


図6 速度場の計測結果

って計測したノンペネトレイティブ対流の瞬時の温度場・速度場の同時計測結果の一例である。ただし、フラックスレーン数は $Raf=4.8 \times 10^9$ である。これらの温度場の計測結果によると、下側の加熱壁面付近から高温ブルームが上昇する様子が見られ、上面近傍ではきのこ状の巻き込みが見られる。一方、それに対応する速度場の計測結果によると、ブルームは上昇流を伴うこと、ならびにそのような上昇流は流体層の高さ中央付近で強い加速を受け、その後減速過程に至ることがわかる。上面付近では、上昇流は強い減速効果を受け、周囲壁面に沿って拡散し、その近傍に発生したブルームによる上昇流の影響によって再び流体層内部へと向かう循環流を形成

する。このような水平流体層に発生するノンペネトレイティブ対流の対流パターンは、より小さいレーン数における実験結果 (Fujisawa and Funatani 2000) と定性的に一致しており、本実験の健全性を示唆する。

感温液晶を用いた温度場・速度場の同時計測実験では、温度計測精度 0.12 が得られた (Fujisawa and Funatani 2000)。しかしながら、液晶の呈色温度範囲は 2 以下と狭いため、液晶の呈色温度に一致するある一瞬の温度計測しか行えないこと、ならびに計測温度範囲外の温度領域では温度エラーが発生するなどの課題が残った。特に後者の課題は統計量計測上重要であり、予め流体層内の温度分布が呈色温度域内か外かを判断できないため、感温液晶法による定量温度計測をこの種の流れに適用することが困難なものにしている。これに対して、本実験の2色LIFでは、量子化誤差 0.005 、温度校正誤差 0.1 、レーザー強度の非一様性に伴う誤差 0.05 、画像処理に伴う誤差 0.05 と見積もれるため、温度計測精度は 0.12 と同程度である。しかしながら、2色LIFでは、感温液晶法でしばしば問題となる校正曲線の非線形性による温度誤差ならびに呈色温度域外の温度エラーが存在しないため、より信頼性の高い温度計測が可能であると判断できる。

(2) 背景シュリーレン法CT法

背景シュリーレンCT法による温度場・速度場の再構成法の計測精度は、擬似画像法を用いて検証を行った。ここで用いた擬似画像は、正弦波状の周期的輝度分布画像である。これを対象とする温度場と仮定し、これに微小移動量を加えることで、2枚のペア温度画像を作成した。さらに相互相関計算を行うことで、温度場の移動量から速度場を評価した。ただし、速度場の計測精度は、温度勾配や相関領域の影響を受けることから、これをパ

ラメータとして種々の擬似画像を作成した。一方、実験画像の持つノイズの影響は、ノイズレベルを種々変えることでその影響を調べた。シミュレーションの結果、本実験に対応した温度勾配では、相関領域サイズが 21×21 [pixels] から 31×31 [pixels] に増すとエラーベクトル割合が大幅に減少する。しかし、 41×41 [pixels] では、エラーベクトル割合の減少率が低下するが、同時に空間分解能が低下することが分かった。

背景パターンシュリーレン・CT 法により得られた温度分布の一例を図 6 に示す。ただし、これらの結果は、種々の高さ位置 z における水平断面の温度分布の計測結果である。図 7 は、温度画像に対して 3 次元相関解析を適用して得られた z 方向の速度分布である。速度計測はノズル出口から高さ 20 [mm] の断面で行った。ただし、3 次元相関領域サイズは $25 \times 25 \times 7$ [boxels] とした。温度勾配の大きい領域においては信頼性のある速度分布が捉えられたが、温度勾配が小さい領域ではエラーが認められた。したがって、この種の 3 次元、温度場・速度場計測精度を改良するには、温度計測精度の向上と更なる相関領域の最適化が今後の課題である。

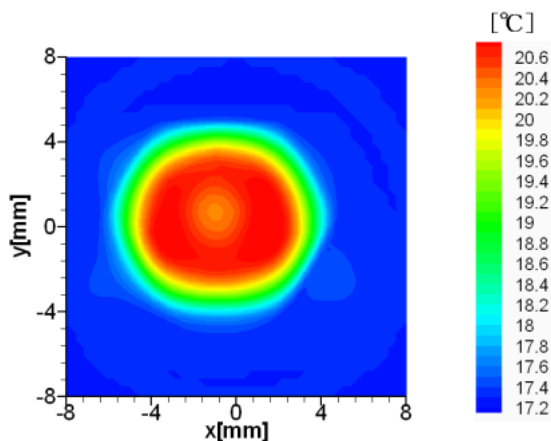


図 7 温度場の計測結果

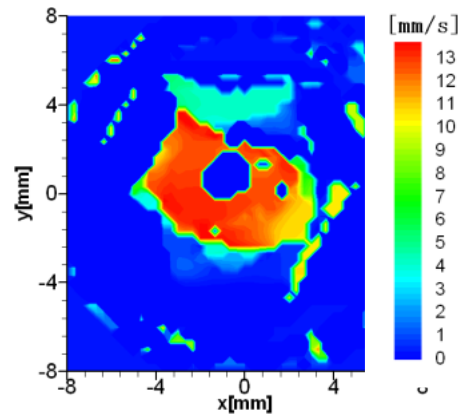


図 8 速度場の計測結果

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

N. FUJISAWA, S. FUNATANI and Y. WATANABE, Simultaneous Imaging Techniques for Temperature and Velocity Fields in Thermal Fluid Flows, J. Visualization, Vol.11(2008), pp.247-255. 査読有

N. FUJISAWA, T. TAKASUGI and S. FUNATANI, Visualization of Near-field Turbulence in Buoyant Jet by Combined LIF and PIV Measurement, oceedings of 13th International Symposium on Flow Visualization, 2008.7.1-4, Nice, France, Paper 188. 査読有

N. FUJISAWA and M. WATANABE, Fluid Art of Turbulence in Unsteady Non-Penetrative Thermal Convection, J. Visualization, Vol.11(2008), p.185. 査読有

N. FUJISAWA, M. WATANABE and Y. HASHIZUME, Visualization of Turbulence Structure in Unsteady Non-penetrative Thermal Convection Using Liquid Crystal Thermometry and Stereo Velocimetry, J. Visualization,

Vol. 11(2008), pp.173 - 180. 査読有
Y. WATANABE, Y. HASHIZUME and N. FUJISAWA, Temperature Measurement by Two-Color LIF Technique Using Nd:YAG Lasers, J. Visualization, Vol.10(2007), pp.345-346. 査読有
N. FUJISAWA, Y. WATANABE and S. FUNATANI, Recent Development of Simultaneous Measurements and Visualization of Temperature and Velocity Fields and Their Application to Thermal Flow Phenomena, 9th FLUCOME, Tallahassee, U.S.A, 2007.9.16-19, Paper 245 (Keynote Speech). 査読有
N. FUJISAWA, M. WATANABE and Y. HASHIZUME, Visualization Study on Coherent Structure of Non-Penetrative Turbulent Thermal Convection, 9th FLUCOME, Tallahassee, U.S.A, 2007.9.16-19, Paper 156. 査読有

[学会発表](計6件)

首藤智明、藤澤延行、高杉健、日本機械学会北陸信越支部第46回講演会、浮力ブルームの三次元可視化法の開発と乱流構造、富山(富山大学), 2009.3.7

N. FUJISAWA, G. SATO and Y. OHKAWA, Measurement of Temperature and Velocity Field in Buoyancy Driven Flows, DFD08 Bulletin, San Antonio, U.S.A, 2008.11.23-25, Abstract AS7.

高杉健、藤澤延行、船谷俊平、流れの可視化とLIF-PIV計測による浮力ブルームの乱流構造に関する研究、可視化情報学会第36回可視化情報シンポジウム、東京(工学院大学新宿校舎), 2008.7.22-23.

佐藤元、藤澤延行、背景パターンシュリーレン法による層流ブルームの3次元温度分布計測、日本機械学会北陸信越支部第45回講演会、福井(福井工業大学), 2008.3.8

N. FUJISAWA, G. SATO, Three-dimensional Temperature Reconstruction of Steady and Unsteady Buoyant Plume by Background Schlieren Technique Combined with Computed Tomography, 60th Annual Meeting of the Division of Fluid Dynamics, Salt Lake City, U.S.A, 2007.11.18-20, DFD07 Bulletin, Abstract F15.

佐藤元、藤澤延行、中島耕司、相浦智史、大久保雅一、背景パターンシュリーレン法による加熱細線周りの3次元温度計測、可視化情報学会第35回可視化情報シンポジウム、東京(工学院大学新宿校舎)(2007.7.24-25)

[その他]

ホームページ等

<http://tmfujisv.eng.niigata-u.ac.jp/center/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤澤 延行 (FUJISAWA NOBUYUKI)
所属 新潟大学・自然科学系・教授
研究者番号: 20165369