

室温空気流れの温度速度同時計測及び適用可能範囲の検討

2016年3月修了 人間環境学専攻 47-146716 藤森 千晴

指導教員 染矢 聡 客員准教授

A lifetime-based combined measurement of temperature and velocity, “TSParticle method”, has been proposed in the previous studies. Temperature sensitive luminescent particles were utilized as tracer particles of the particle image velocimetry. Temperature was estimated from the luminescent lifetime of particles. Uncertainties of temperature and velocity measurement were evaluated using simulated images in this study. TSParticle method was demonstrated by an air flow around heated rod and flat plate. Visualized temperatures in the wake behind the rod were verified with temperatures detected by thermocouples(T.C.). Besides, visualized velocity and temperature near the plate were compared with numerically simulated ones and temperature measured by T.C.. All visualized time-averaged velocities and temperatures agreed well with the numerical values and measured values by T.C.

Key words: Simultaneous measurement, Temperature, Velocity, Air flow, PIV, TSParticle

1 緒言

近年原油価格の高騰に伴い、高度な熱活用技術のニーズが高まってきている。車両・室内空調においては、より少ないエネルギー使用量で快適性を維持するシステムが望まれている。搭乗者を模擬したサーマルマネキンを用いたシステムの最適化などが行われているが、対流温度分布の把握が難しい等の問題が残っている。また空調以外にも排ガスやエンジンまわりの気流など排熱活用や効率の冷却のための気体の温度分布計測は重要な技術である。

一方で、気体流れの温度分布に関連する研究においては、多くは数値シミュレーションで解析した報告である¹⁾。これまでに気流の温度分布を実測する手法が確立されていなかったため、実測例は乏しい。

本研究では、気体を含む任意の作動流体の流れ場の温度と速度が計測可能で、広範囲の温度域に拡張可能な温度速度同時計測法(以下、TSParticle法²⁾)を提案してきた。そこで本研究では、この解析手法に起因する誤差や、実際の流れ場を計測する際の適用可能条件を評価するために、人工画像³⁾を用いた評価を行った。また、加熱円柱及び加熱平板周りの空気流れの温度速度同時計測を行い、結果をPIV速度計測⁴⁾及び数値シミュレーションと比較する。

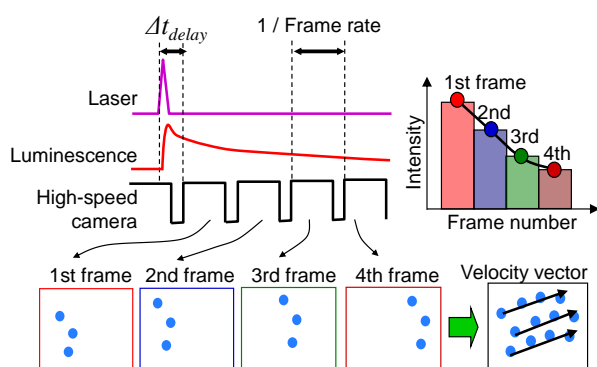


Fig.1 A concept of TSParticle method

2 TSParticle 法

TSParticle 法では粒子の燐光強度の減衰係数が温度に依存して変化する特徴を用いて温度を計測する。燐光画像取得のタイミングチャートを Fig.1 に示す。UV レーザで励起した粒子の燐光を高速度カメラで撮影(40,000 frame/s(以下, fps))して複数枚の画像を取得し、検査領域

内の平均燐光強度の相対変化率から温度を解析する。構造物からの蛍光を除いてトレーサ粒子からの燐光のみを撮影するために、励起の 2~10 μ s 後から撮影を開始し、取得した画像から温度と速度を算出する。速度の算出では Fig.1 に示すように 1 回の励起後の燐光画像のうち、適切な時間間隔の 2 枚の画像を用いて PIV 解析を行う。通常、PIV 法では例えば 16 \times 16pixel ほどの検査領域内の粒子像のパターンを追跡して速度を算出するが、TSParticle 法では温度解析においても速度解析同様に検査領域を設定し、検査領域毎の温度を求める。

3 解析手法に起因する誤差の評価

TSParticle 法では、長時間連続的に発光する燐光粒子の画像を撮影する。そのため、粒子像が流れ方向に伸びた変形粒子画像(以下、TSP 画像)となっている。本手法における速度算出では TSP 画像に PIV 解析を適用するため、通常の粒子画像(以下、PIV 画像)を用いる場合と精度が異なる可能性がある。また、温度解析においても、燐光粒子の発光を一定の露光時間で捉えた数枚の画像から燐光寿命を求めるため、露光時間や粒子の移動速度が温度算出精度に影響する可能性がある。その他、粒子数密度や励起光強度など、多くの影響因子が考えられるため、人工画像を用いて本手法に内在する誤差について検討した。

スペースの都合上、詳細は省略するが、速度場解析においては、4 枚の画像を取得する時間(100 μ s)の粒子移動量が 8pixel 以内であれば、PIV 画像と TSP 画像を用いた際の速度分布解析結果及び誤差はほぼ同じであった。温度解析において 100 μ s 間の粒子移動量が 8pixel 以下、すなわち 1 画像あたりの移動量(変形量)が 2pixel までであれば、温度評価誤差及び標準偏差は小さくなった。ただし、4 コマで撮影した 4 枚の画像(100 μ s)での減衰を基に温度を解析する場合、粒子移動量が 8pixel 以上かつ寿命が 250 μ s 以上の条件では、得られる温度の偏差が大きくなった。得られる温度の平均値は寿命にほとんど依存せず、移動量が大きいほど偏差が大きくなる傾向を示した。すなわち、利用する燐光粒子の発光寿命が露光時間の 10 倍より長く、撮影時間中に検査領域サイズの半分以上の距離を粒子が移動する場合に、燐光寿命の偏差が 10 μ s となり温度解析誤差が大きくなることがわかった。この制約は本研究の温度解析において粒子移動を考慮せずに検査領域内の輝度の変化率を求めているためと考えられ、粒子移動を考慮に入れつつ温度解析を行うことで改善できると考えられる。

4 加熱円柱周りの温度速度同時計測

4.1 実験方法及び温度校正実験

Fig.2に示す循環型実験装置を用いて加熱円柱周りの空気の温度速度分布計測を行った。観察及び励起光入射用の窓はテンボックスガラス, その他は断熱性を考慮してベークライトで作製した。図中右側の上下二段のファンにより観察部への流入速度を制御した。装置底面に設置したモータにより, その上に設置した不織布シートに沈降する粒子を気流中に巻き上げる構造となっている。実験では上昇気流が銅製の加熱円柱(直径 20mm)を通過する際の空気の温度分布と速度分布を計測する。円柱中心部に設置したカートリッジヒータ(80W)とヒータに隣接する熱電対(K型)(円柱表面から 5mm)を用いて, 円柱温度を一定に制御した。燐光粒子はユーロピウム錯体を焼結した中空多孔質シリカ(平均直径 $2\mu\text{m}$)を使用し, シングルパルスレーザ(Nd:YAG, 355nm, 10Hz)によって励起した。励起された燐光粒子からの燐光を高速度カメラ($640 \times 480\text{pixel}$, 40000fps, 空間解像度: $68.0\mu\text{m}/\text{pixel}$)で撮影し, 温度と速度を算出した。円柱表面におけるレーザ光の反射などによって円柱後流の可視化計測が困難であること, また温度速度の特徴的な変動は円柱後流で見られることから, Fig.2に示すように, 円柱中心の下流側 3mm の位置を左下端とする $43.5 \times 29.4\text{mm}$ の領域を観察領域とした。

実験ではまず燐光強度の減衰係数と温度を関係付ける校正実験を行った。ここでは装置内の温度場を $25 \sim 50^\circ\text{C}$ に変化させ, 温度一様場で燐光画像を撮影した。各温度において得られた画像の検査領域($16 \times 16\text{pixel}$)毎の相対輝度の時間変化を一次指数関数で近似することによって減衰係数を算出し, 得られた減衰係数と熱電対で測定した撮影時の装置内温度の値を, 最小二乗法を用いて二次関数に近似して校正関数を作成した。

ここで, 校正関数を作成するまでの 2 回の近似と校正実験に起因する誤差の評価を行った結果の一例を Fig.3に示す。温度一様場で取得した校正用画像について, 温度が未知であると仮定し, 校正関数を適用して温度を算出することで, 画像撮影時に熱電対で測定した温度(横軸)と画像解析によって算出した温度(縦軸)との比較を行った。その結果, 熱電対で測定した温度と本計測手法による解析結果との誤差は, 平均 $0.24 \pm 0.14^\circ\text{C}$ となり, 高精度の校正関数を作成できた。また各温度条件におけるランダム誤差は $0.071 \pm 0.025^\circ\text{C}$ と極めて小さく, 画像及び解析の再現性が高いことから, 励起光強度や粒子数密度の変動など校正時の時間変動は計測にほとんど影響を与えていないと考えられる。これは温度算出に輝度の相対変化率を用いる寿命法のアドバンテージの一つであり, 人工画像を用いた評価結果とも一致する。Fig.3における誤差の要因としては, 最小二乗法を用いた 2 回の近似や校正実験時の気流温度分布の一様性が考えられる。

4.2 実験結果及び考察

本実験では観察領域への流入速度($V_{in}=38.5 \sim 52.6\text{cm/s}$, $Re=481 \sim 657$)(代表長さ: 円柱直径 20mm)と円柱温度($T=50.0 \sim 70.0^\circ\text{C}$, $Ra=1.7 \sim 3.2 \times 10^4$)を系統立てて変化させ, 加熱円柱周りの温度速度分布を計測した。Fig.4,5にそれぞれ流入速度 38.5, 52.6cm/s, 円柱温度 50, 70°C の条件で測定した温度と速度の時間平均分布を示す。解析結果は温度, 速度ともに 5 秒間の解析結果の平均値であり,

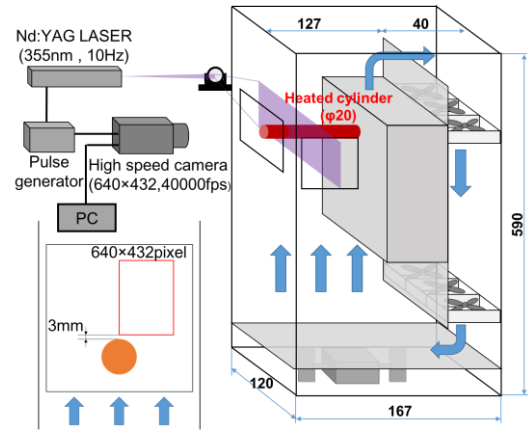


Fig.2 Experimental apparatus

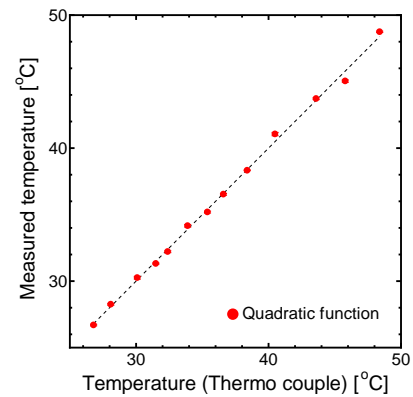


Fig.3 Accuracy of calibration function

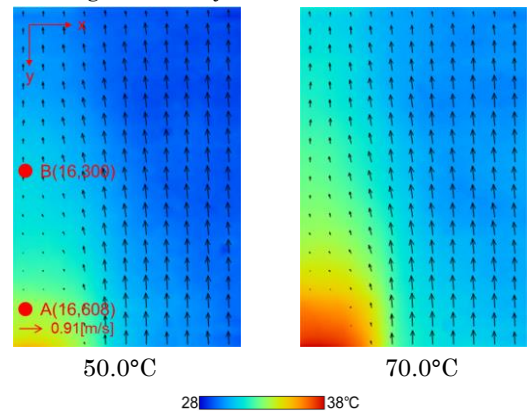


Fig.4 Time-averaged velocity and temperature field ($V_{in}=38.5\text{cm/s}$)

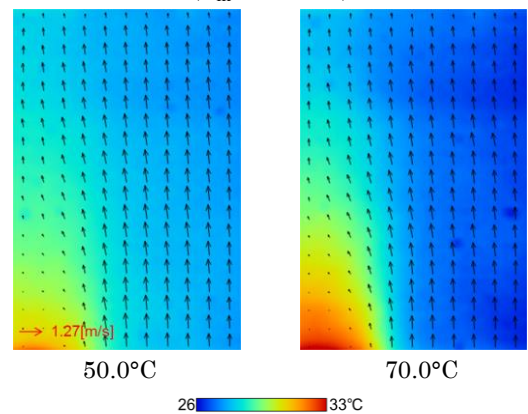


Fig.5 Time-averaged velocity and temperature field ($V_{in}=52.6\text{cm/s}$)

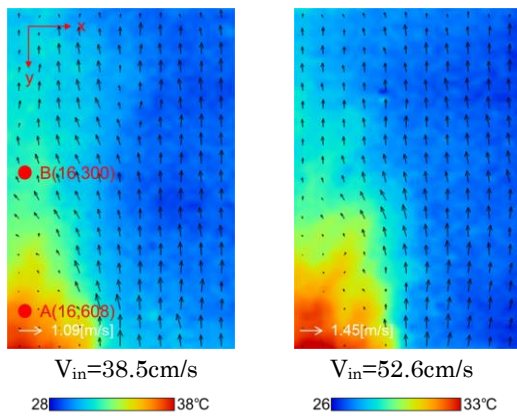


Fig.6 Instantaneous velocity and temperature field
($T=70.0^{\circ}\text{C}$)

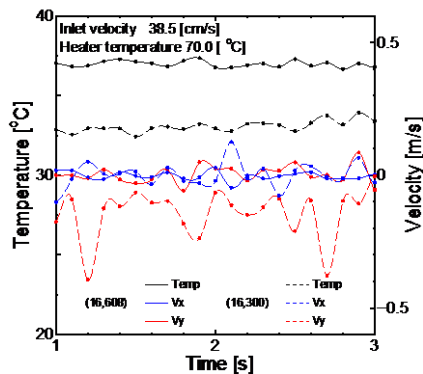


Fig.7 Time series variation of velocity and temperature
($V_{in}=38.5\text{cm/s}$, $T=70.0^{\circ}\text{C}$)

カラーコンターは温度、ベクトルは速度を示している。また Fig.6 に Fig.4,5 の $T=70^{\circ}\text{C}$ の条件における瞬時の温度速度分布を示す。Fig.4,5,6 より、同じ流入速度であれば円柱温度が高い方が円柱近傍の空気の温度が高く、同じ円柱温度であれば流入速度が小さい方が円柱近傍の温度が高いことがわかる。レイノルズ数が 300 を超えることから、円柱後流でカルマン渦の振動が見られ、形成される渦内部の流動は乱れる。Fig.6 中のベクトルでは円柱後流が蛇行する様子が捉えられている。

Fig.7 に Fig.6 の左図に相当する流入速度 38.5cm/s 、円柱温度 70.0°C の場合の図中 A,B 点における、温度と速度 2 成分の時系列変動を示す。実線が上流(A)、点線が下流(B)での値を示しており、二点間の距離は 20.9mm である。点 A,B における温度の時間平均値はそれぞれ 37.1°C 、 33.2°C であり、同じ点の観察面よりやや後方にシース熱電対(T)を設置して別途測定した時間平均温度は 37.1°C 、 33.0°C であり、可視化計測結果の方が 0.2°C 程度高い値を示している。AB 点間の差は可視化結果が 3.9°C 、熱電対が 4.1°C であり、その他のデータについても同様の値が得られているため、可視化計測と熱電対の計測結果はよく一致しているといえる。また、Fig.7 より、上流側の温度の変動の直後に下流側で遅れて変動している様子を定性的に捉えることもできている。

速度の時間変動については、流れに垂直な方向の速度成分(V_x)はほぼ 0 であり、流れ方向の速度成分(V_y)は流入速度の $1/2$ 以下の範囲で変動していることがわかる。なお、ストローハル数を 0.2 とすると、本実験条件における後流の振動数は $3.85\sim 5.26\text{Hz}$ である。レーザの繰り返し周波

数(10Hz)と撮影時間(5s)の制約のため、FFT などの周波数解析は行えなかった。

5 加熱平板周りの温度速度同時計測

5.1 実験方法及び温度校正実験

Fig.2 に示した実験装置の円柱を銅製平板に変更し、等温平板周りの流れを可視化計測した。平板内部にカートリッジヒータ (80W)2 本と K 型熱電対(平板先端から 15mm)を挿入し、平板温度を一定に制御した。その他、レーザを装置上部から入射した点、カメラの空間解像度が $71.4\mu\text{m}/\text{pixel}$ になった点以外は 4 章と同様の方法で実験を行った。校正関数の誤差評価について Fig.3 同様に行った結果、熱電対で測定した温度と本計測手法による解析結果との誤差は、平均 $0.99\pm 0.30^{\circ}\text{C}$ 、各温度条件におけるランダム誤差は $0.15\pm 0.079^{\circ}\text{C}$ となり、円柱実験の校正関数(Fig.3)に比べると誤差が若干増加したが、高精度の校正関数を作成できた。

5.2 実験結果及び考察

観察領域への流入速度($V_{in}=77.8, 88.5\text{cm/s}$)と平板温度($T=60.0, 70.0^{\circ}\text{C}$, $Ra=3.8, 4.9\times 10^2$)を系統立てて変化させ、加熱平板周りの温度速度分布を計測した。Fig.8 に $V_{in}=77.8\text{cm/s}$, $T=60.0, 70.0^{\circ}\text{C}$ の条件で測定した温度と速度の 5 秒間の平均分布を示す。カラーコンターは温度、ベクトルは速度を示している。2つの解析結果より、同じ流入速度であれば平板温度が高い方が平板近傍の空気の温度が高くなることが可視化結果からわかる。

Fig.9 には Fig.8 の右図に相当する $V_{in}=77.8\text{cm/s}$, $T=70.0^{\circ}\text{C}$ の場合の図中 A,B 点における、温度と速度 2 成分の時系列変動をまとめた。実線が平板近傍側(A)、点線が平板から遠ざかった位置(B)での値を示しており、二点間

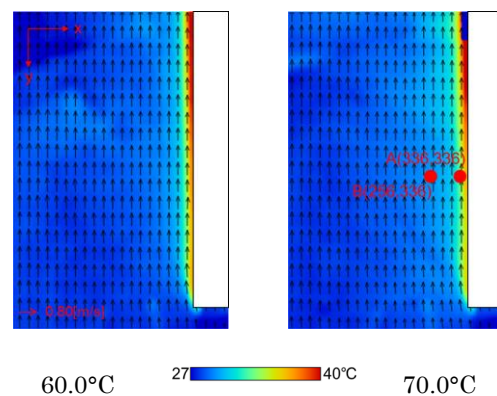


Fig.8 Time-averaged velocity and temperature field
($V_{in}=77.8\text{cm/s}$)

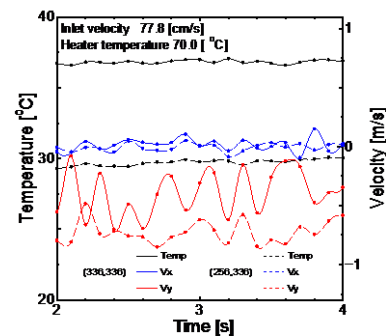


Fig.9 Time series variation of velocity and temperature
($V_{in}=77.8\text{cm/s}$, $T=70.0^{\circ}\text{C}$)

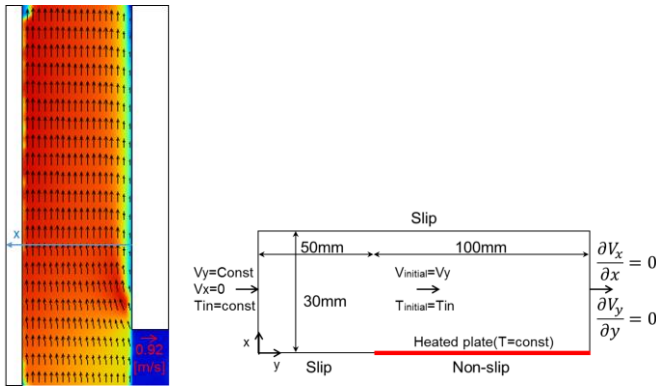


Fig.10 Time-averaged velocity and field
($V_{in}=77.8\text{cm/s}$, $T=60.0^\circ\text{C}$) (left)

Fig.11 Schematics of CFD model (right)

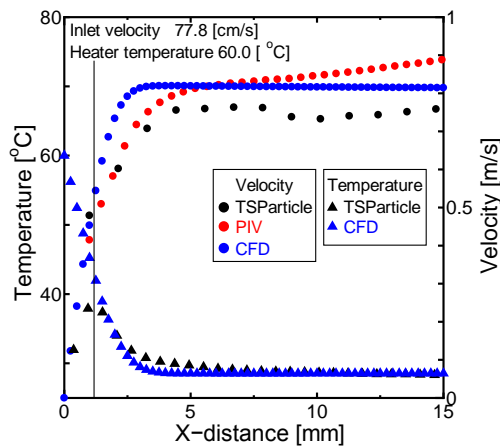


Fig.12 Velocity and temperature verification

の距離は 5.7mm である。点 A,B における温度の時間平均値はそれぞれ 36.7°C , 29.4°C であり、平板反対側の対称な位置で T 型熱電対により別途測定した時間平均温度は 36.7°C , 29.8°C であった。A 点においては同じ、B 点においては熱電対の値の方が 0.4°C 高い値を示す。その他の実験条件でも同様の結果が得られているため、可視化計測と熱電対の計測結果はよく一致しているといえる。

TSParticle 法による速度計測の妥当性を確認するため、ダブルパルスレーザ(532nm, 30Hz)、カメラ(448×1024 pixel, 60fps, $58.1\mu\text{m}/\text{pixel}$)を用いて PIV 計測を行った。流入速度 77.8cm/s 、平板温度 60.0°C において PIV 法で得た 33 秒間の時間平均速度分布を Fig.10 に示す。壁近傍で速度が低下していることを定性的に確認できる。

実験条件に合わせたモデル(Fig.11)について数値シミュレーション(CFD)を行い、温度と速度を TSParticle 法の計測結果と比較した。格子は $X \times Y = 120 \times 600 (=72000)$ とし、1 格子あたりの大きさは $250 \times 250\mu\text{m}$ とした。実験条件に合わせた流入速度、平板表面温度を与え、下流から自由流出する条件で解析を行った。

Fig.10 中に青線で示した平板先端から 17.6mm の断面における流れ方向の速度を Fig.12 に示す。横軸の 0 は平板表面を表している。平板近傍(約 1mm)はレーザ光の反射により計測できなかった。赤い点が PIV 法、黒い点が TSParticle 法による速度解析、青い点が CFD の結果を示

している。図から平板から離れた位置で PIV 解析と CFD 結果が比較よく一致するものの、平板近傍の速度勾配の大きい領域では結果が異なっている。PIV の検査領域(1.14mm)内で約 5cm/s の速度勾配がついていることに起因する計測誤差と考えられる。PIV 法と TSParticle 法による速度解析結果の比較では、平板近傍では良く一致しており、平板から離れた領域で結果が異なる。CFD と比較すると、平板表面から 15mm の位置で 5.6cm/s の差が生じている。この誤差は画像解析において僅か $0.06\text{pixel}/\text{dt}$ に相当し、解析精度に起因する誤差ではないと考えられる。

CFD による温度解析結果と TSParticle 法による温度測定結果を比較する。速度解析同様に平板先端から 17.6mm の断面における温度について、流入速度 77.8cm/s 、平板温度 60.0°C 条件の結果を Fig.12 にまとめた。平板から離れた、加熱による影響がない領域では、実験と CFD の結果がよく一致している。平板から 2~4mm の位置では実験結果が CFD より約 2°C 高く、緩やかな勾配の温度分布となった。CFD 結果より、1.14mm の検査領域内に 1.5°C の温度勾配があると考えられ、TSParticle 法では検査領域内の平均温度を求めめるため、勾配が緩和されたものと考えられる。

6 結言

TSParticle 法の適用可能範囲の検討及び加熱円柱/平板まわりの空気流れの温度速度同時計測、また実験結果と PIV を用いた速度解析や数値シミュレーションとの比較を行い、以下の知見を得た。

1. TSParticle 法において、速度解析に使用する 2 枚の画像間の粒子像移動量が 8pixel までであれば、PIV 法と同等の誤差で速度分布を計測可能である。
2. 撮影時間中の粒子移動量が検査領域サイズの半分以下で、利用する燐光粒子の発光寿命が露光時間の 10 倍より短い条件で、ランダム誤差 5%以下の温度分布計測が可能である。
3. 円柱温度及び流入流速を変化させつつ、加熱円柱周りの複合対流を計測した結果、流れの定性的な変化を確認できた。熱電対で計測した時間平均温度及び任意の 2 点間の温度差と、可視化結果がよく一致した。
4. 加熱平板周りの温度速度を計測した結果、任意断面における温度と速度の分布が、PIV 法による速度計測及び CFD 解析結果と一致した。

文献

- 1) 三角利之, 上岩史欣, 北村健三: “大きな水平加熱円柱まわりの自然対流の流動と伝熱”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.64, No.618. pp.477-484, (1998)
- 2) S. Someya, Y. Okura, M. Uchida, Y. Sato, K. Okamoto, “Combined velocity and temperature imaging of gas flow in an engine cylinder”, Optics Letters, 37(23), pp.4964-4966, (2012)
- 3) K. Okamoto, S. Nishio, T. Saga, T. Kobayashi, “Standard images for particle-image velocimetry”, Meas. Sci. Technol., 11, pp.685-691, (2000)
- 4) 岡本孝司, 小尾晋之介, 笠木信英, 川橋正昭, 小林敏雄, 榎原潤, 佐賀徹雄, 塩路昌宏, “PIV ハンドブック”, 森北出版, pp.4-7, (2002)