

# 2014 年度 研究調査事業実績報告書

## 1. [研究調査テーマ名]

P I V技術を用いた温度場、流れ場解析の実用化

## 2. [目 的]

空間における流れ計測と同時に温度計測を行なう技術を、車内空調等を目的とした試験研究に適用可能とするため、同技術の適用可能範囲を明らかにするとともに、比較的シンプルな熱流動場への適用例を示す。これにより空間での伝熱特性を計測するための技術として確立する。

## 3. [本研究調査事業の内容]

### 1) はじめに

地球環境問題において CO<sub>2</sub> 低減の技術開発として、車室内空調においては、より少ないエネルギーでの快適制御が望まれている。具体的には、吹出口から出る気流や車室内の空気の温度分布を最適化し、温熱快適性を損なわずに低エネルギーでの空調の実現が求められている。複合対流場の熱流動に関する研究では、これまでに比較的単純な流れ場である加熱円柱周りの流れを数値シミュレーションで解析している例が数多く報告されている<sup>(1)</sup>。しかしながら、これまで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、実測例は比較的乏しい。

これまでに本研究では、気体の計測が可能で、広範囲の温度域に適用可能な温度・速度同時計測手法を(以下、TSP 法)開発してきた<sup>(2~4)</sup>。TSP 法は、レーザ励起による機能性粒子からの燐光強度の時間変化率を利用した温度計測と粒子画像流速測定法(PIV)を組み合わせた計測手法である。これまで TSP 法を適用した例としては、エンジン筒内のガス流れの温度速度同時計測<sup>(2)</sup>や酢酸ナトリウム三水和物を用いた潜熱蓄熱における固液相変化時の熱対流計測<sup>(4)</sup>に適用した例などが挙げられる。

本研究では、車室内空調を想定し、強制対流と自然対流が共存する複合対流場に着眼した。従来の研究と作動流体や温度範囲が異なるため、新しく作成した低速気流用の機能性粒子を用いて温度速度を計測する。複合対流場における熱伝達挙動の計測として、加熱円柱周りの温度速度同時計測を行い、TSP 法を使用した計測の検証を行った。

### 2) 燐光寿命法

TSP 法では温度依存性を持つ機能性粒子の燐光の発光強度の時間変化率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。紫外線のシングルパルスレーザで励起した粒子の燐光を高速度カメラで撮影して複数枚の画像を得る。一定の空間解像度と画像の明るさを確保するため、例えば毎秒 4 万枚、1 画像あたり 25 $\mu$ s ほどの比較的長い露光時間で画像を撮影し、発光強度の時間変化率から温度を算出する。励起光による粒子及び円柱等の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した画像を温度と速度の算出に使用する。具体的には、1 枚目の露光が終了する 5 $\mu$ s 前に励起を行い、2~5 枚目の 4 枚で励起後 5~105 $\mu$ s までの燐光を撮影した。速度算出に関しては、2 回の励起直後の散乱光を含まない最も明るい画像を使用して PIV 解析<sup>(2)(4)</sup>を行う場合と、Fig.1 に示すように 1 回の励起後の燐光画像のうち、適切な時間間隔を持つ 2 枚の画像を使用する速度解析<sup>(3)</sup>の 2 通りの方法がある。本研究では粒子の移動速度を考慮して、1 回の励起後の 2 枚目と 5 枚目の画像を使用して PIV 解析を行った。

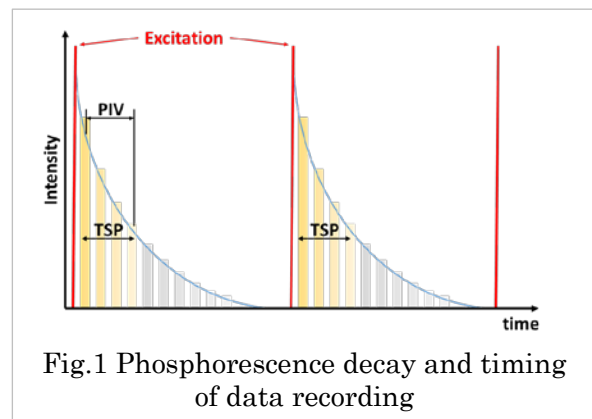


Fig.1 Phosphorescence decay and timing of data recording

### 3) 実験

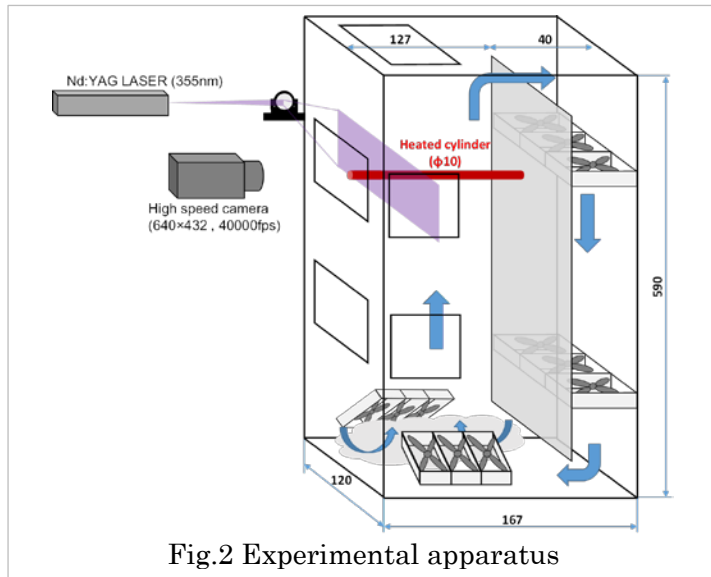


Fig.2 Experimental apparatus

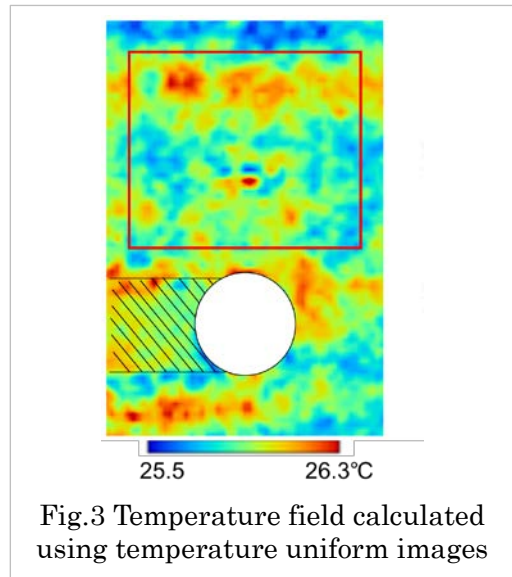


Fig.3 Temperature field calculated using temperature uniform images

本研究では機能性粒子を周囲環境に漏出させずに流れの温度と速度を制御するため、Fig.2に示す循環式の実験装置を作製した。観察部への気流の流入速度は図中右側の上下二段のファンによって制御する。また装置の底面に取り付けた下向きのファンによって粒子の沈降を抑制する。計測対象の円柱は直径 10[mm]の銅製で、加熱は円柱内部に埋め込まれたカートリッジヒータ(直径 2.3[mm] , 100[W])によって行う。燐光粒子には、ユーロピウム錯体(EuTTA)を焼結した中空多孔質樹脂(平均直径 : 52 $\mu$ m)を使用し、紫外線シングルパルスレーザ(Nd:YAG , 第三高調波(355nm), 10Hz)によって励起する。励起された機能性粒子からの燐光を高速度カメラ(640 $\times$ 432pixel, 40000fps, 空間解像度 : 71.4[ $\mu$ m/pixel])で撮影し、温度及び速度の算出に使用した。

実験ではまず燐光強度の時間変化率(以下、減衰係数)と温度を関係づける校正実験を行う。装置内に温度制御用のヒータを設置し、循環装置内部の温度一様に保つ。ここでは温度を 25 $^{\circ}$ C~50 $^{\circ}$ C の範囲で変化させて校正実験を行った。各温度において円柱周りの気流の流れを撮影し、画像の各検査領域(16 $\times$ 16pixel, オーバーラップ 50%)における減衰係数を算出する。燐光の発光強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た。次に、得られた減衰係数と撮影時に制御した温度の値を基に、最小二乗法を用いて校正関数を作成する。また、校正関数を決定するまでに二回の最小二乗近似プロセスを要するため、これらに起因する誤差の評価を行った。温度一様場で取得した校正関数作成用の画像について、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、画像取得時に設定した実温度と画像解析によって算出した温度との比較を行う。

校正関数を作成した後、Fig.2に示した加熱円柱の温度(65 $^{\circ}$ C, 75 $^{\circ}$ C, 85 $^{\circ}$ C, 95 $^{\circ}$ C, 115 $^{\circ}$ C)及び流入速度(0.45~ 0.70 [m/s] (Re=280~430 程度))をパラメータとして変化させ、加熱円柱周りの空気の温度と速度を計測した。

### 4) 結果及び考察

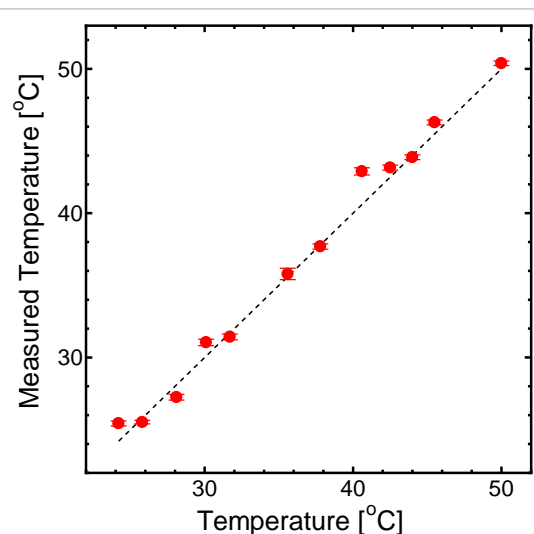


Fig.4 A measurement error of temperature

#### 4.1) 温度算出誤差

Fig.3 に温度一様場(25.8°C)で取得した画像について温度を算出した結果を示した。画像は校正関数作成に用いた画像と同じであることから、先に述べた二回の近似による誤差が無ければ、25.8°C で温度が一様となる結果を得るはずである。なお、構造物(円柱)および円柱によりレーザ光が遮られる範囲では計測が困難であるため、以下の校正関数の精度評価では、Fig.3 中に赤枠で示した範囲における温度の平均値と標準偏差の算出を行う。

Fig.4 に各温度において算出した温度の平均値及び標準偏差を示す。横軸に実温度(°C)、縦軸に計測結果の平均値及び標準偏差のエラーバーを示している。誤差がない場合は黒色の点線上に並ぶはずであるが、誤差によりわずかに点線からずれている。Fig.4 より、各条件における平均温度と実温度の差、及び標準偏差が小さいことが分かる(最大誤差:  $2.0 \pm 0.42^\circ\text{C}$ )。

#### 4.2) 加熱円柱周りの温度速度計測結果

加熱円柱周りの空気の流れの温度速度同時計測では、空気の循環速度、すなわち観察領域への流入流速を一定に保ち、温度を変化させながら実験を行った。本実験装置には冷却系がないため、装置内の空気の温度が徐々に上昇する。そのため実験ごとに観察部に流入する空気の温度がわずかに異なる。

Fig.5 に流入速度 0.46[m/s]、円柱加熱温度 65°C、115°C の条件における温度(カラーマップ)及び速度(ベクトル)の時間平均分布を示す。ここで時間平均は温度、速度ともに 40 秒間の瞬時解析結果を用いて算出した。平均温度分布から加熱円柱の温度による円柱後流部での温度上昇の違いが確認された。また冷却系がないために、円柱の加熱による影響が少ない観察面への流入部や円柱から離れた領域でも温度が上昇している。

速度分布の解析結果から、解析範囲内における最大流速は円柱両サイドを流れる位置で 0.85[m/s] が得られた(円柱加熱温度: 115°C)。ここで一様流れ中の円柱周りの流れにおいて円柱真横の流速は流入速度の 2 倍の値になることが知られているため、PIV 解析結果は良好な結果であると考えられる(1.87 倍)。さらに、Fig.6 に流入速度 0.45[m/s]における円柱加熱温度 65°C と 115°C の速度差を示す。図は 115°C の解析結果から 65°C の解析結果を引き算しており、円柱後流部において高温の方が速度が上昇していることが確認できる。これは円柱の加熱に伴う上昇気流の発生に起因しているものだと考えられる。具体的には円柱加熱温度 65°C に対して 115°C の方が最大 0.14[m/s]速くなることが明らかとなった。また上流部や後流の円柱から離れた領域に関しては、低温の方が高温より流速が速くなるという結果となった。上流部における原因としては円柱下側近傍の浮力が下向きにかかることが挙げられる。また後流の円柱から離れた位置での減速についても、円柱近傍の浮力に起因するものだと考えられる。

Fig.7 に流入速度 0.46[m/s]、円柱加熱温度 115°C の条件における温度(カラーコンター)と速度(ベクトル)の瞬時解析結果を示す。まず速度場解析の結果から、時間平均結果解析(Fig.5)と同様、円柱両サイドにおいて流速が増加していることが確認できる。また円柱後流部において流れの揺らぎ及び渦の発生が確認できる。さらに温度を一定に保ちながら速度を変化させた結果としては、速度の上昇に伴い渦の位置が変化することが明らかとなった。また円柱後方の渦が発生する範囲での揺らぎの伝搬速度についても流入速度に応じて変化することを確認した。

温度場解析においては、円柱後流位置において流れに揺らぎに合った高温領域の揺らぎの発生について確認出来る。具体的には、流入流速 0.46[m/s]、円柱加熱温度 115°C の条件では、円柱後流高温領域の温度は 45°C 程度、円柱後流低温領域の温度は 33°C 程度になっていることが明らかとなった。

Table 1 に流入速度(0.46[m/s]、0.50[m/s])及び円柱加熱温度(65°C~115°C)を変化させた場合の Fig.5 中の点 A(280,350)における温度の推移について示す。加熱温度をパラメータとして各流入速度について見てみると、流入速度 0.46[m/s]及び 0.50[m/s]両条件において加熱温度の上昇に伴って点 A における温度も上昇していることが確認できる。また同一加熱温度において速度を変化させた場合について比較してみると、速度の上昇に伴い温度が低下していることが分かる。この原因としては、加熱円柱によって温められた気流が流れによって後流部分に推移していくため速度の上昇によって円柱付近の温度が低下しているものだと考えられる。

Fig.8 に、Fig.7 に示す 2 点(白丸)の速度・温度の時系列グラフを示す(流入速度: 0.46[m/s]、円柱加熱温度: 115°C)。横軸に時間(s)、縦軸(左)に速度(m/s)、縦軸(右)に温度(°C)を示しており、グラフから、速度変化に伴う温度変化を検出した。具体的には、主流方向の速度(y 方向の速度)成分が 0 に

近づくと、つまり淀み点となる時に温度の上昇が見られる。2点間(2cm)の流速はPIV解析結果から約9.25[cm/s]であることが確認出来た。また、グラフ(12.5[s]付近)から温度の移動速度(上流部:紫線, 下流部:緑線)を計算すると約10.0[cm/s]であり、強制対流速度よりやや速い速度で移流していることがわかった。

最後に加熱円柱の直径を30[mm]に変化させた場合について、流入速度0.46[m/s]、円柱加熱温度115°Cの条件における速度場の時間平均解析(Fig.9)及び瞬時解析(Fig.10)の結果について示す。円柱直径の変更に伴い渦周波数及び揺らぎの周波数の低下が確認出来た。さらに渦構造の変化についても確認出来た。

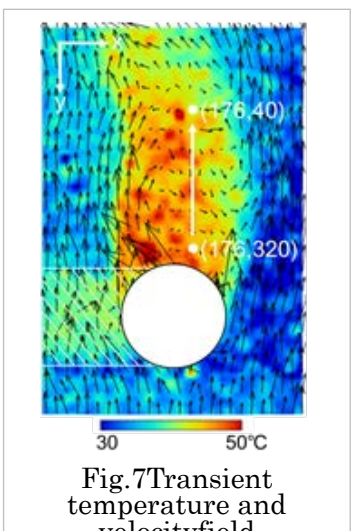
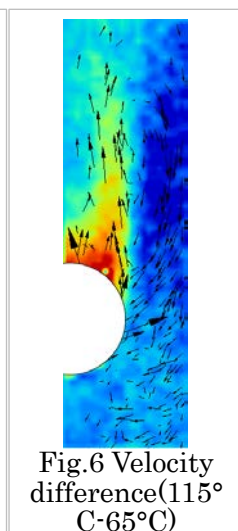
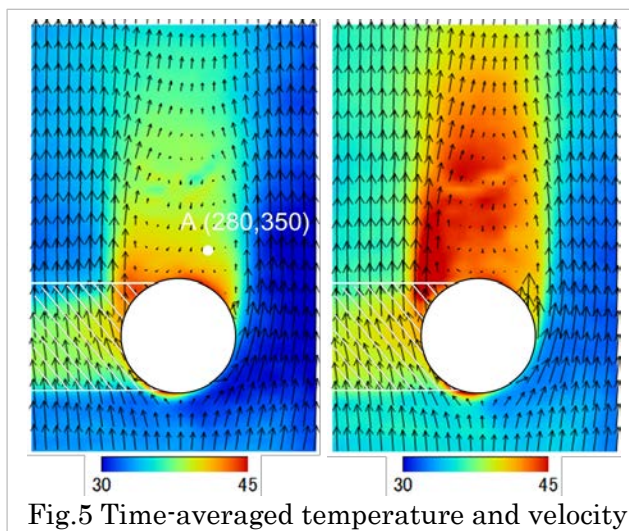
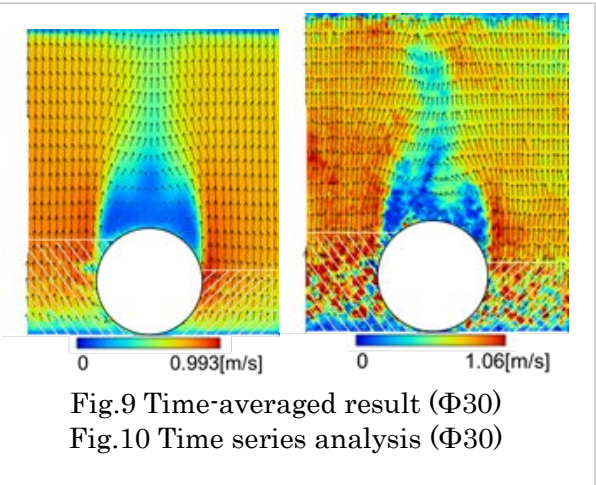
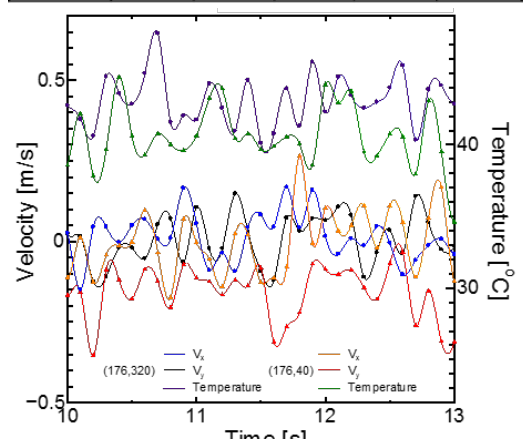


Table 1 Temperature transition

	65°C	75°C	85°C	95°C	115°C
0.457[m/s]	41.5°C	43.5°C	44.4°C	45.5°C	46.1°C
0.497[m/s]	40.1°C	40.2°C	40.6°C	40.7°C	40.7°C



5) 参考文献  
 (1)三角ほか, 機論 64(618),(1998-2,151-158  
 (2)Someya 他,Opt.Lett.,37,(2012),4964-4966  
 (3)Someya 他, Exp.Fluids, 50, 1(2011), 65-73  
 (4)大内他, 熱工学コンファレンス 2014(2014), F142

#### 4. [本研究調査事業の成果]

成果について具体的にご記入ください。

本研究では加熱円柱周りの気流の温度速度同時計測を行い、円柱加熱温度と流入速度をパラメータとして変化させた場合の温度・速度の変化について検討した。その結果、以下の知見が得られた

- (1) 速度場解析から最大速度である円柱両サイドを流れる気体の流速が流入速度の約2倍になっていることを確認した。
- (2) 速度場解析・温度場解析から、加熱円柱近傍での温度に伴う上昇流の変化を確認した

(3) 温度場解析から、加熱温度及び流入速度による温度の変化が確認でき、流れに追従した熱の移動を確認した。

## 5. 委員会活動への影響

今回の研究調査において委員会活動へ影響した点についてご記入ください。

これまで伝熱技術部門委員会のシンポジウムの他、委員会会合にて情報共有を進めてきた。基盤技術の伝熱委員会として新たな測定法を確立することで、新たな分野での活用等、委員会活動の中が広がり、活性化が期待できる。

## 6. 今回の研究調査結果について、発表方法を下記より選択してください（複数回答可）。

- 会誌への記事掲載（\_\_\_年\_\_\_月号を予定）  
 春季大会オーガナイズドセッションでの発表（2016年春季大会を予定）  
 春季大会フォーラムでの発表（\_\_\_年春季大会を予定）  
 シンポジウムでの発表（2016年2月を予定）  
 出版物の発行（印刷物、CD-ROM）（\_\_\_年\_\_\_月頃の発行を予定）  
 その他（具体的にご記入ください）

## 7. 受給額と執行額

受給総額	800000 円
執行総額	798679 円

費目	使用例	実際の使用内容	予算額(円)	執行額(円)
印刷製本費	資料印刷費、複写費、編集外注費、CD製作費など			
諸謝金	原稿料			
通信運搬費	運送用レンタカー代、宅配料			
委託費	外部への委託費			
開発費	システム開発費			
資料購入費	参考資料、書籍等購入費			
物品購入費	実験に必要な部品類など	気流循環装置、アクリルチャンネル		451224
消耗品費	燃料代、実験に必要な消耗品類	ファン、高熱伝導放熱シート、熱伝導グリス、熱電対コネクタ他		347455
臨時雇用費	アルバイト代			
その他				
合計(円)				798679

以上