直方体周り流れの PIV・LDA 計測*

野村 友和¹, 石間 経章², 小保方 富夫²

Analysis on Flow around a Rectangular Cube by Means of PIV and LDA

Tomokazu NOMURA, Tsuneaki ISHIMA and Tomio OBOKATA

ABSTRACT

Analyses on a flow around a rectangular cube set on the floor in a wind tunnel are described. The study has been carried out using a particle image velocimetry (PIV) and a two-dimensional laser Doppler anemometry (2D-LDA) with fiber optics. At the inlet, the mean flow velocity and the relative turbulence intensity are 4.0 m/s and 1.5%, respectively in the experiments. Under this condition, the flow Reynolds number based on the rectangular cube height and the mean velocity is about 8.8×10^3 . Firstly, comparisons between the LDA and PIV results are made about the mean velocity, turbulent intensity and Reynolds stress. Secondly, the influences of the size of interrogation area in PIV measurement are discussed. Finally, the visualizations of vortices distributions are performed by the Reynolds decomposition and the Galilean decomposition methods, which use the instantaneous and the averaged velocity fields obtained by PIV measurements.

Keywords : Laser sheet, PIV, LDA, Air flow

1. 緒 言

流れの可視化技術は、流体力学において重要な実験手法の一つである。可視化技術の中でも PIV (Particle image velocimetry) は、瞬間的な二次元または三次元の流速情報を得ることが出来るため、流れ場の解析に有効である。

PIV は点計測である LDA (Laser Doppler anemometer) と比較して多くの優れた点があるが、一般に PIV は時間分解能が LDA よりも低く、両者から得られるデータの特長にも違いがある。したがって、PIV と LDA から得られる結果を比較することは両測定方法の特徴の議論と、流れの解析に有用である。

本研究では、もっとも基本的な流れの一つである直方体周りの流れ^{1) - 4)} を、PIV と LDA を用いて測定し、それらの測定データを比較するとともに、乱流特性や測定精度の相互検証を行うことを計画した。ここではその第一段階として、両測定法による平均流速と乱れ強さ及びレイノルズ応力分布の比較について報告する。また、PIV により得られる瞬時流速分布に対してレイノルズ分

解、Galilean 分解^{5), 6)}などを適用することで直方体周り流れの瞬時の渦構造を解析した。

2. 実験装置および方法

2.1 PIV

PIV による実験装置の概要を Fig. 1 に示す。本研究では、流れに平行に設置された直方体 (長さ 65 mm × 幅 58 mm × 高さ 31 mm) 周りの流れを、PIV で測定した。風洞はプロアにより大気を吸い込む方式である。座標系

Fig. 1 Experimental setup for particle image velocimetry.

* 原稿受付 2002 年 8 月 14 日

¹ 正会員 群馬大学 大学院 (〒 376-8515 群馬県桐生市天神町 1-5-1, E-mail: d1m211@me.gunma-u.ac.jp)

² 正会員 群馬大学 工学部

は、直方体の床面上先端を原点とし、流れ方向を x 軸、流れと直角な横方向を y 軸、鉛直上方を z 軸とした。整流ノズルの出口寸法は幅 400 mm×高さ 200 mm で、テストセクションの長さは 1000 mm である。テストセクションの上流には 1 枚のハニカムと 4 枚の整流格子を入れ、整流ノズル出口ではほぼ均一な流速分布を得ている。なお、プロア手前にも 1 枚の整流格子を入れ、系としての流れを安定させている。主流平均流速は 4.0 m/s、乱れは主流平均流速の約 1.5% 程度である。また、主流平均流速と測定対象である直方体の高さをそれぞれ代表流速と代表長さとした時のレイノルズ数は $Re = 8800$ である。

PIV 処理装置には、DANTEC 社製 Flow Map 2000 を使用した。また、レーザ光源にはダブルパルス Nd:YAG レーザ (New Wave Research 社: Model SOLO III-15, 出力 50 mJ/pulse) を、CCD カメラには KODAK MEGAPLUS ES-1.0 (ピクセル数: 1008 × 1018) を使用した。PIV では画像を用いる計測法のため、測定領域寸法が空間分解能に影響を与える。本実験では測定領域を水平方向及び鉛直方向に 58 mm×58 mm とした。さらに、検査領域 (Interrogation area) は、空間分解能を上げて十分な測定精度を得るため 32 pix×32 pix (検査領域実寸 1.8 mm×1.8 mm) とし、パルス間隔は予備実験で最適化して $\Delta t = 60 \mu\text{s}$ とした。また、オーバーラップは 50%×50% とした。なお、ここでは約 200 枚のベクトル図から測定点ごとに平均し平均流速 (U , m/s), その変動分の乱れ強さ (u' , rms m/s), レイノルズ応力 ($u'w'$, m^2/s^2) を求めた。

2.2 LDA

LDA による実験装置の概要を Fig. 2 に示す。LDA 光学系にはアルゴンガスレーザ発振器 (NEC 製: GL55700, 総合出力 2W) の波長 488 nm の光、および He-Ne ガスレーザ発振器 (NEC 製: GLS3200, 25 mW) の波長 632.8 nm の光を使用した。それぞれのレーザ光はビームスプリッタにより 2 本の光に分割された後、ブラッグセルにより周波数シフトを与えられる。周波数シフトは 488 nm 光がそれぞれ 85 MHz と 80 MHz で両者の差を 5.0 MHz, 632.8 nm 光が 83 MHz と 80 MHz でその差を 3.0 MHz とした。入射光の交差全角はそれぞれ 3.10° および 5.82° である。また、入射光の測定体積は直径 122 μm ×長さ 4.51 mm と 198 μm ×3.91 mm であるが、斜め 30° の前方散乱方式としたため有効寸法は直径 122 μm ×長さ 0.4 mm 及び 198 μm ×0.4 mm である。散乱用粒子には超音波加湿器の水粒子 (平均粒径 5~6 μm) を用いた。散乱光は光電子増倍管 (Photomultiplier: DANTEC 社製 55X08, 及び浜松ホトニクス社製: R5070) で電気信号に変換され、BSA (Burst Spectrum Analyzer: DANTEC 社製) で信号処理されて、コンピュータ上に時系列データとして記録される。流速測定は主流方向である x 方向及び z 方向について行い、その測定点は Fig. 3 のように選んだ。また、測定の際にはそれぞれ

Fig. 2 Experimental setup for two-dimensional laser Doppler anemometry measurements.

10000 点ずつの時系列データを取得した。両方向流速の時系列データから、設定時間間隔 20 μs 以内で取得されたデータのみを同一粒子による信号として扱い、平均流速、乱れ強さ及びレイノルズ応力を求めた。なお、データレートは測定点ごとに異なるが 1~2 kHz 程度であった。

3. 結果および考察

3.1 平均流速分布

Fig. 4 は直方体周りの流れの模式図を示している。直方体周りの流れは、衝突、旋渦、剥離、再付着および再循環領域などを伴う複雑な乱流となっている。Fig. 5 は PIV カメラにより撮影された床面近く ($z = 5 \text{ mm}$) の平面における直方体周り流れを示している。カメラの撮影領域の関係から、図は 3 枚の画像を合成したものである。衝突、旋渦、剥離流と後流領域が散乱粒子により可視化されている。直方体の前方には、旋渦領域 ($-25 \text{ mm} < x < 0 \text{ mm}$, $|y| < 30 \text{ mm}$) が存在し、この領域は直方体前方の小さな再循環領域の形成と関係している。また、直方体の側方から後方へまわりこむ流れが観察できる。

Fig. 6(a)~(e) に直方体の中心軸上における PIV 測定と LDA 測定の流れ方向平均流速分布の比較を示す。PIV 測定結果は、測定点が多いため全測定点の半分のみをプロットしている。Fig. 6(a) は、直方体前方 $x = -10 \text{ mm}$ の測定値であり、流れが直方体に衝突することにより床付近に逆流領域がみられる。PIV と LDA の測定値はほぼ

Fig. 3 Measuring points for LDA.

Fig. 4 Schematic of mean flow pattern.

Fig. 5 Flow images around a rectangular cube at $z = 5$ mm plane Pulse width 5 ns by Nd:YAG laser).

同様の分布を示しているが、逆流領域内 ($0 \text{ mm} < z < 10 \text{ mm}$) では、両測定値にはわずかな差がある。Fig. 6(b) は直方体上方 ($x = 32.5 \text{ mm}$) の結果を示している。直方体上方でも、PIV と LDA の測定結果に違いはなく、直方体上方には先端からの剥離により小さな再循環領域の存在が確認できる。Fig. 6(c)–(e) は直方体後方の結果を示している。Fig. 6(c)(d) では、再循環領域が確認され、これらの測定点でも PIV と LDA の測定結果は同様の分布傾示している。しかし、再循環領域内では絶対値にわずかな違いがみられ、LDA の方が逆流が強い。Fig. 6(e) の $x = 125 \text{ mm}$ の測定では、逆流はほとんど存在せず両結果の違いは Fig. 6(c)(d) に比べて小さい。

両者の違いはトレーサ粒子が逆流域へ入りにくいことによるバイアス効果⁷⁾、測定範囲の大きさの違いなどが考えられるが、両者はほぼ一致しており計測法間の顕著な差はない。なお乱れのカットオフ周波数 (LDA)、測定領域 (PIV) に起因する差については後述する。

3.2 LDA 測定におけるカットオフ周波数の影響

本節では、カルマン渦のような低周波数の流速変動を乱れと考えるかどうかを考察するため、LDA による測定結果に周波数分離法を適用した。周波数分離法はあるカットオフ周波数 (f_c) を設定して、その周波数以下の成分で変動する平均流速を再構成し、これにと重畳する変動を乱れとして扱う手法である⁸⁾。Fig. 7 は、 $x = 85 \text{ mm}$, $z = 40 \text{ mm}$ の直方体直後の測定点においてカットオフ周波数による平均流速と乱れ強さの変化を示している。本実験は定常流であり、当然のことながら平均流速はカットオフ周波数の影響は受けない。しかし、乱れ強さに関してはカットオフ周波数を増加させるとともに減少して、約 60 Hz を超えたところで減少が緩やかになりほぼ一定値になる。

供試直方体を二次元角柱とした場合、カルマン渦は 13 Hz 程度、また角柱後方ではその 2 倍の周波数が予想される。そのためカットオフ周波数を 25 Hz に設定して再計算して得られた平均流速、乱れ強さ分布を Fig. 8 に示す。平均流速は、直方体の前 ($x = -10 \text{ mm}$)、直後 ($x = 85 \text{ mm}$) とともに周波数分離法の適用による影響はみられない。

Fig. 6 Comparisons of mean velocity U distributions on the centerline between PIV and LDA.

Fig. 7 Influence of cut off frequency.

Fig. 8 Comparisons of mean velocity and turbulence intensity distributions by difference in cut-off frequency.

Fig. 9 Comparisons of turbulence intensity u' distributions on the centerline between PIV and LDA.

乱れ強さに関しては、カットオフ周波数が 0 Hz の時には全乱れ成分が含まれているため 25 Hz の場合より大きな値を示している。直方体前方で、 $z = 35$ mm 以下の領域でカットオフ周波数を 25 Hz に設定することで乱れ強さが約 60% 程度に小さくなっているが、分布形状は相似形のままである。それに対して直方体後方では、カットオフ周波数を 25 Hz に設定することで全体的に乱れ強さが小さくなり、とくに $z = 20 \sim 40$ mm 付近の直方体上面後方で分布傾向にも違いが見られる。直方体後方には、カルマン渦やそれに準ずるような低周波数の変動流の発生とその影響が予想されるが、明確なカルマン渦は形成されていず、相当する周波数も観察されていない。また、 $z = 60, 80$ mm と直方体から離れると乱れ強さの差はみられなくなる。なお、PIV 測定においては、測定点ごとの約 200 個のランダムデータから、平均流速と変動強さを求めているので、低周波数成分の分離はできず、全変動分の評価となる。

3.4 乱れ強さおよびレイノルズ応力分布

Fig. 9(a) – (e) は直方体の中心軸上における PIV および LDA 測定による乱れ強さ分布を示している。なお、前節で示したように LDA 測定では評価する周波数範囲が問題となるがここでは、全周波数範囲 ($f_c = 0$ Hz) を用いた乱れ強さで比較する。Fig. 9(a) は直方体前方 $x = -10$ mm の結果であり、PIV と LDA の結果は同様の傾向を示しているが、床付近では、PIV の結果は LDA の結果に比べて乱れ強さが小さく、ピークの位置にもわずかな違いが見られる。これと同様の結果が直方体上方である Fig. 9(b) においても観察される。Fig. 9(c) は直方体後方の結果を示している。PIV および LDA の結果は分布の傾向がよく一致しているが、詳細にみると、PIV は LDA 測定値と比べて $z = 20 \sim 40$ mm 付近で小さくなっている。Fig. 9(d) では、 $z = 15 \sim 40$ mm で Fig. 9(c) と同様に PIV の結果がわずかに小さい。乱れ強さに関して、PIV に比べて LDA の結果の方が大きい値を示しているのは、前節で示した LDA 測定における乱れの周波数範囲の違いによるものではなく、次節で示す PIV による空間平均化の影響と予想される。

Fig. 10(a)–(e) には直方体の中心軸上における PIV および LDA 測定によるレイノルズ応力の分布を示す。PIV と LDA の測定結果は全体的にどの測定点においても分布の傾向は同様であるが、Fig. 10(b) では、PIV の結果のピーク値が LDA と比較して大きくなっている。Fig. 10(c)–(d) でも、絶対値に少しの違いがみられるがその差は小さく分布傾向は同様である。

3.5 検査領域の影響

PIV 測定における検査領域の大きさの影響を調べるため、上記に示した結果に加えて、検査領域を小さくして空間分解能を高くした計測結果を Fig. 11 に示す。PIV 測定の検査領域の大きさはそれぞれ $1.8\text{ mm} \times 1.8\text{ mm}$ と $0.9\text{ mm} \times 0.9\text{ mm}$ である。平均流速に関しては、二つの

検査領域の大きさによる顕著な違いは見られない。しかし、直方体前方の $x = -10\text{ mm}$ の測定線上の $z = 10\text{ mm}$ 以下と、直方体の後方である $x = 85\text{ mm}$ の測定線上の $z = 20\text{ mm}$ 付近では、空間分解能の違いにより PIV 測定結果に違いが見られ、空間分解能が高い方が LDA の結果に近い値を示している。

乱れ強さに関しては、 $x = -10\text{ mm}$ の結果より、空間分解能が高いものの方が低いものに比べてピークの値が大きく、LDA の結果にも近くなっている。直方体後方である $x = 85\text{ mm}$ においても、 $z = 20 \sim 30\text{ mm}$ 付近で同様の傾向を示している。両測定線上の結果からも速度勾配の大きな所において、空間分解能による影響が現れている。PIV 測定において検査領域が大きい場合には、その

Fig. 10 Comparisons of vertical distributions of Reynolds Stress $u'w'$ on the centerline between PIV and LDA.

Fig. 11 Influence of the size of interrogation area in PIV measurement.

検索領域内で粒子の運動が平均化されて乱れ強さが小さめに計測されるものと考えられる。本実験の場合、PIV に比べ LDA は空間分解能が高く、より狭い範囲の乱れを評価していると思われる。しかし、LDA 測定では、粒子供給量の不均一性によるバイアシングも考えられるので、測定値に誤差が含まれている場合も予想される。また、この場合 LDA、PIV 測定ともに時間的に大きな「流れのゆらぎ」も乱れとして評価している。いずれにせよ、空間分解能の違いは乱れ強さの結果に影響を与えることがわかる。

3.5 空間的渦構造

PIV は瞬時に二次元の速度場を計測することができるので空間的な渦構造の理解に有効である。本研究では、瞬時の流れ場の可視化に PIV を適用し、渦の空間的な分布を観察した。渦構造の可視化手法にはレイノルズ分解、Galilean 分解、LES 分解、渦度分布表示などがあり広く使われている^{5), 6)}。本研究では、渦度表示、レイノルズ分解および Galilean 分解などを直方体周り流れの解析に適用した。

Fig. 12 ~ 16 は PIV 測定とその処理結果を示している。これらすべての結果は同一の観察領域の結果であり、その大きさは $58 \text{ mm} \times 58 \text{ mm}$ で、検索領域のサイズは $1.8 \text{ mm} \times 1.8 \text{ mm}$ であり、YAG レーザのパルス間隔は $60 \mu\text{s}$ とした。ベクトルは $50\% \times 50\%$ のオーバーラップを適用しているため 0.9 mm 間隔で表示されている。

Fig. 12 は直方体後方の中心軸上における x - z 平面の瞬時のベクトル図を示している。主流と再循環領域の境界線が直方体の上方から床に向かっていく様子が分かる。一つの渦が $x = 92 \text{ mm}$, $z = 20 \text{ mm}$ の位置に観測できるが、その他の渦は明確には確認できない。

Fig. 13 は約 200 枚の瞬間流速分布を平均した平均流速分布を示している。図から直方体背後の剥離領域に一つの大きな渦構造があり、その中心は約 $x = 80 \text{ mm}$, $z = 20 \text{ mm}$ である。

次に、より小さなスケールの流れを評価するために、レイノルズ分解を適用する。レイノルズ分解は次式のよう定義される。

$$\mathbf{u} = \mathbf{U} + \mathbf{u}' \quad (1)$$

ここで各測定点ごとに $\mathbf{u}$ は瞬時流速、 $\mathbf{U}$ は平均流速であり $\mathbf{u}'$ はレイノルズ分解⁹⁾により得られた変動流速である。レイノルズ分解は、瞬時流速を平均流速と変動流速に分解するものであり、乱流の統計的な解析に最も広く適用されている手法である。平均流速を十分長い時間における平均として決定することができれば、長い時間スケールをもつ要素とその他の短い時間スケールをもつ要素に分解することができる。**Fig. 14** にレイノルズ分解により得られた変動流速分布を示す。この変動流速は、各点において **Fig. 12** の瞬時流速分布から **Fig. 13** の平均流速分布を引いたものである。**Fig. 14** より、小さな渦が再

Fig. 12 Instantaneous velocity fields.

Fig. 13 Mean velocity fields.

Fig. 14 Reynolds decomposed fluctuation velocity fields.

循環領域内及び再循環領域と主流の境界付近に多数存在していることがわかる。これらの渦構造は、**Fig. 12** の瞬時平均流速分布では確認できないものであり、それらの

Fig. 15 Vorticity distribution.

Fig. 16 Fluctuation velocity fields by Galilean decomposition.
 $U_c = 1.3 \text{ m/s}$, $V_c = -0.2 \text{ m/s}$

渦は各点の局所平均流速により移動しているものである。

Fig. 15 には渦度分布を示している。渦度は次式により得られる。

$$\omega = \frac{\partial w}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2)$$

この値も Fig. 12 に示している瞬時流速分布から計算されたものである。絶対値の大きな渦度は再循環領域と主流とのせん断層の中にみられる。いくつかの正と負の値（例えば $x = 100 \text{ mm}$, $z = 34 \text{ mm}$ ）をとる渦度の組の存在も確認できる。すなわち、いくつかの逆回転する渦の組がせん断層の中に存在することを示している。

Fig. 16 には瞬時流速分布から一定の対流流速を引いた Galilean 分解の結果を示している。これは次式により求めたものである。

$$u = U_c + u_c \quad (3)$$

ここで、 u は瞬時流速、 U_c は測定面内で一定の対流流速、 u_c が Galilean 分解により得られる変動流速である。

Fig. 17 Reynolds decomposed fluctuation velocity and vorticity distributions.

Galilean 分解は平均流速と変動流速の分解手法のうち最も簡単なものであり、対流流速 U_c は自由に選択することができ、適切に設定すればその流速に対応して移動する渦構造の可視化及び解析に有効である。今回の場合、対流流速は画面内全てのベクトルの平均流速である $U_c = 1.3 \text{ m/s}$, $V_c = -0.2 \text{ m/s}$ としており、再循環領域外縁の速度勾配が大きいところに瞬時流速分布では確認できない渦構造が見られる。これらの渦塊は、対流流速 (U_c , V_c) により移動するものである。さらに $x = 100 \text{ mm}$ での渦の大きさは 10 mm 程度であることがわかる。また、この対流流速に設定した場合には、レイノルズ分解により得られた瞬時変動流速分布と比較して詳細な渦構造は観察できない。

Fig. 17 には、直方体の上部においてレイノルズ分解により得られた変動流速分布と渦度分布を示している。直方体の先端からの剥離により生じるいくつかの対になる渦が、レイノルズ分解と渦度分布の両方から観察されている。

4. 結 言

PIV と LDA により直方体周りの流れの解析を行い、それらの結果から平均流速、乱れ強さ及びレイノルズ応力について比較を行った。さらに、PIV により得られた瞬時流速分布にレイノルズ分解、Galilean 分解を適用して以下の結論を得た。

- (1) 直方体周りの流れの測定から、平均流速に関して PIV と LDA の測定値はよく一致している。
- (2) 乱れ強さおよびレイノルズ応力に関しては、PIV と LDA の結果はほぼ同様の傾向を示すが、PIV の測定値は LDA の測定値に比べて僅かに小さい。原因として、空間分解能の差、流れの中の低周波数変動成分の存在などが考えられる。
- (3) PIV の測定結果にレイノルズ分解と Galilean 分解を適用し、剥離線に沿った渦などが可視化できた。

本報告では、PIV と LDA の両測定法における測定結果

の概要を比較した。今後さらに測定条件と精度の関係についての検討を予定している。

参考文献

- 1) Sousa, J. M. M., Freek, C., Pereira, J. C. F.: PIV Measurements of Turbulence Statistics in the Three-Dimensional Flow Over a Surface-Mounted Obstacle, Proc of the 9th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Dynamics, Lisbon, No. 22.4. (1998) pp. 22.4.1–22.4.11.
- 2) Martinuzzi, R., Tropea, C.: The Flow Around Surface-Mounted Prismatic Obstacles Placed in Fully Developed Channel Flow, ASME J. Fluids Eng., Vol. 115 (1993) pp. 85–92.
- 3) Schofield, W., Logan, E.: Turbulent Shear Flow Over Surface-Mounted Obstacles, ASME J. Fluids Eng., Vol. 112 (1990) pp. 376–385.
- 4) 高橋易資, 野村友和, 石間経章, 小保方富夫: PCC 法による直方体周りの流れのシミュレーションを実験による検証 (直方体が斜めの場合), 日本機械学会論文集 (B), Vol. 68, No. 666 (2002) pp. 331–337.
- 5) Adrian, R. J., Christensen, K. T., Soloff, S. M., Meinhart, C. D., Liu, Z.-C.: Decomposition of Turbulent Fields and Visualization Vortices, Proc of the 9th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Dynamics, Lisbon, No. 16.1. (1998) pp. 16.1.1–16.1.8.
- 6) Adrian, R. J., Christensen, K. T., Liu, Z.-C.: Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields, Experiments in Fluids 29 (2000) pp. 275–290.
- 7) 大沢敏彦, 小保方富夫: レーザ計測, 裳華房 (1994) pp. 117.
- 8) 小保方富夫, 橋本徹, 五十木慎一, 柄沢隆夫, 志賀聖一, 倉林俊雄: 四サイクル火花点火機関における燃焼室内ガス流速の LDA 測定 (第2報, ガス流動に対する燃焼の影響), 日本機械学会論文集 (B), Vol. 58, No. 550 (1992) pp. 2036–2040.
- 9) Tennekes, H., Lumley, J. L.: A First Course in Turbulence, The MIT Press (1972) pp. 28.