29 3-D PTVによる空気乱流の計測

横浜国立大学 加藤裕之^{*}, 西野耕一

鳥居 薫

3-D PTV measurement of an air turbulent flow

Hiroyuki KATO^{*}, Koichi NISHINO^{*} and Kahoru TORII

A 3-D PTV (three-dimensional particle tracking velocimeter) is constructed for the measurement of an air turbulent boundary layer with zero-pressure gradient at free stream velocity of 4 m/s. A unique illumination technique is developed by using three strobe lamps and a multi-channel signal retarder to obtain relevant particles' images in air flows of relatively high velocities. Tracer particles used are plastic micro-balloons (Expancel, Japan Fillite co., Ltd.), whose average diameter is 50 μ m and density is 36 kg/m³. Examination of particles' traceability verifies that they can follow periodic variation of fluid motions up to 100 Hz, and therefore that their traceability is good enough to resolve streamwise velocity fluctuations in the turbulent boundary layer measured presently. Turbulence statistics including mean velocities, turbulence intensities and the Reynolds stress are presented and compared with hot-wire measurement, previous LDV measurement and DNS data. The present results are in general agreement with those data, thus demonstrating validity and usefulness of the present technique for the measurement of air turbulent flows. However, near wall measurement encounters difficulty caused by adhesion of the particles to the wall.

1. 序論 3-D PTV⁽¹⁾は、速度3成分の瞬時分布の測定が可能であること、逆流を伴う流れにも適用可能であること、等の利点を備えている⁽²⁾。しかし、適用流速範囲が比較的低速(30cm/s以下)であり、作動流体が水に限られているといった改善点が残されている。そこで本研究では、空気流(数m/s程度)の測定が可能な計測システムを構築し、平板乱流境界層を測定した。熱線流速計による測定、従来の測定およびDNSの結果と比較し、3-D PTVの空気流計測への適用性を検討した。

2. 計測システム Fig.1に示したシステム⁽³⁾は、3台の白黒CCDカメラ(SONY, AVC-D7)、画像処理ボード(ユータック, gTOP-1A)、追記形光ディスクレコーダ(TEAC, LV-210A)、RGBプロセッサ(TEAC, VA-500)、ストロボ装置(日進電子, CF-15D-10)、デジタルリタード(菅原研究所, RE-307-U2)等で構成されている。トレーサ粒子画像の録画方式は、既報⁽¹⁾と基本的に同一である。

流れ場の照明は3台のランプハウスを備えたストロボ装置で行い、デジタルリタードで発光タイミングを制御する。Fig.2はそのタイミングチャートで、連続するTVフィールドをはさんで、第1フィールドに1回、第2フィールドに2回の発光を行う。第1-第2発光の時間間隔 Δt_1 を短くすることにより、気流中を比較的高速で移動するトレーサ粒子の追跡を確実にし、第2-第3発光の時間間隔 Δt_2 は所定の測定精度が得られるよう流速に応じて調整する。本測定では Δt_1 (100 μ s)での移動距離が約8画素、 Δt_2 (500 μ s)でのそれが約40画素であった。Fig.3は得られたトレーサ画像の拡大図(フレーム単位)で、第1フィールドに1つ、第2フィールドに2つの粒子像が撮影されている。粒子追跡は3時刻にわたって行われ、 Δt_2 の間隔で速度ベクトルを算出する。

Faculty of Engineering, Yokohama National University
Tokiwadai 156, Hodogaya-ku, Yokohama 240, Japan

Fig.1 3-D PTV system

測定に含まれる不確かさは以下のように評価された.

- ・位置測定 (μm) x方向:21, y方向:44, z方向:18
- ・速度測定 (mm/s) u成分:59, v成分:125, w成分:51

3. 実験装置 Fig.4に示した実験ダクトは $30 \times 30 \text{ cm}^2$ の入口断面を有し, その底板上に発達する零圧力勾配の乱流境界層(主流速度 4 m/s , 主流乱れ 0.6% 以下)を測定対象とした. ダクトは全長 2 m で, 可動上壁(アクリル板, 観察部はガラス板)を調整して, 流れ方向の圧力勾配を零にした. トリッピングのためダクト入口に直径 5 mm の円柱を設置し, 測定はその 1.1 m 下流で行った. ストロボ照明はFig.4の紙面奥行き方向から行い, 測定領域(体積約 $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$)の壁面からの高さに応じて照明位置を調整した. 比較のため, 1型熱線プローブ(ワイヤー径 $5 \mu\text{m}$, 長さ 2 mm)で測定を行った. 流れ場の平均流のパラメータをTable 1に示す.

トレーサ粒子には, プラスチック微小中空体(日本フイライト, エクспанセル551DE, 平均粒径 $50 \mu\text{m}$, 密度 36 kg/m^3)を使用した. このトレーサ粒子をポリエチレン容器に入れ, 送風機で十分に攪拌した. ダクトへの投入は窒素ガスで行い, その流量を乾式流量計で監視した. トリッピングワイヤの 35 mm 上流に直径 12 mm の投入口を設け, 壁面垂直方向に吹き出した(吹き出し速度 $1 \sim 2 \text{ m/s}$). Fig.5は, 流体の周期的速度変動に対するトレーサ粒子の追従性⁽⁴⁾と, 熱線風速計で測定された主流方向速度変動のパワースペクトルである. 速度変動エネルギーは 100 Hz 以下が支配的で, それに対する粒子の追従性は十分であるといえる. 実際, ここに示し

Fig.2 Timing chart of image acquisition

Fig.3 Magnified Particle images

Fig.4 Schematic of experimental setup

た速度変動のrms値が受ける影響は-2%である。

3-D PTVによる測定は、 $0 \leq y \leq 70 \text{ mm}$ をカバーするように壁面からの距離を変えて5回行った。座標系は流れ方向を $x(u)$ 、壁垂直方向を $y(v)$ 、スパン方向を $z(w)$ とした。

4. 結果 Fig.6は速度ベクトル数の分布を示したもので、 $y^+ < 100$ の一部を除いて各位置で1000個以上のデータ数が得られている。壁近傍の測定では、トレーサ粒子の壁面付着のため必ずしも良好な画像は得られなかったが、背景画像の減算処理により速度データを得ることができた。なおFig.6の分布の不連続は、統計量を計算するセルの大きさを壁から離れるに従い0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 1.0 mmと変えたためである。

Fig.7は平均速度を摩擦速度 u_τ で無次元化したものである。ここで、 u_τ は測定結果が対数速度分布にフィットするよう決定した。 $\bar{u}^+$ は熱線流速計およびDNS⁽⁶⁾の結果とほぼ一致している。但し、壁近傍の $y^+ < 6$ ($y < 0.5 \text{ mm}$)では、前述したような粒子付着による影響のため不合理な分布を示している。また、Table 1に示したように、同一の主流速度での3-D PTV測定と熱線流速計測定で境界層厚さが異なるのは粒子吹き出しのためと考えられ、 $\bar{u}^+$ の緩和層での速度分布の違いにもその影響が認められる。一方、 $\bar{v}^+$ は境界層のエントレインメントに対応した分布を示している。また $\bar{w}^+$ はほぼ零で流れ場の対称性の条件をよく満たしている。

Fig.8は速度変動のrms値である。速度測定のノイズの影響を補正するため、上述した不確かさを差し引いてある。本結果は、全ての成分についてLDVによる結果

Table 1 Boundary layer parameters

Parameters	H/W	3-D PTV
Free stream velocity(m/s)	3.98	4.03
Friction velocity(m/s)	0.181	0.176
Kinematic viscosity(mm ² /s)	14.73	14.89
Displacement thickness(mm)	8.17	10.08
Momentum thickness(mm)	5.79	7.11
Shape factor	1.411	1.418
Reynolds number based on momentum thickness	1560	1920
Friction coefficient($\times 10^{-3}$)	4.14	3.81

Fig.5 Particle traceability and power spectrum of streamwise velocity fluctuations

Fig.6 Number of vector data

(*)と妥当な一致を示している。相違点は、 u'^+_{rms} のピーク値が大きいこと、 w'^+_{rms} が外層($y^+ > 300$)で系統的に大きなことである。これらは、上述の平均速度の場合と同様に、粒子吹き出しの影響と考えられ今後の検討課題である。Fig. 9はレイノルズ応力の分布であるが、比較的ばらつきが大きいものの、従来の結果と比較して妥当な分布を示している。

5. 結論 空気乱流の測定を目的とした3-D PTVを開発し、零圧力勾配の平板乱流境界層を測定した。本測定条件である主流速度4m/sに対して、使用したトレーサ粒子は十分な追従性を有し、可視化状況も良好であった。平均速度、乱れ度、レイノルズ応力の測定結果は従来の結果と妥当な一致を示し、本手法の空気乱流計測への有用性が確認された。一方、トレーサ粒子の壁面付着のため壁近傍(概ね、 $y < 1\text{mm}$)での測定には問題がある。

謝辞 本研究の遂行にあたり東京大学工学部笠木伸英教授のご協力を頂いた。また文部省科研費(総合研究(B), 03352018, 研究代表者小林敏雄教授)の援助を受けた。本学学生柴崎博晶氏、安立利明氏、村越和彦氏のご協力に謝意を表する。

文献 (1)笠木・西野, 1990, 流れの計測, 8-11, 2. (2)西野ら, 1989, 機論, 55(B)-510, 404. (3)西野, 1991, 機械学会講習会フレッシュメンセミナー資料. (4)Hjelmfelt, A.T. & Mockros, L.F., 1966, Appl. Sci. Res., 16, 149. (5)Spalart, P.R., JFM, 172, 307. (6)Karlsson, R.I. & Johansson, T.G., 1988, Laser Anemometry in Fluid Mech., Eds. R.J. Adrian et al., 273.

Fig.9 Reynolds stress distributions

Fig.7 Mean velocity distributions

Fig.8 Distributions of turbulence intensities