54 高速VTRによる速度計測手法の開発

電中研 犬丸 淳*, 原 三郎, 浜松 照秀, 阿部 俊夫

Development of a new measurement method of velocity vectors
using a high speed VTR

Jun Inumaru*, Saburo Hara*, Teruhide Hamamatsu* and Toshio Abe*

A new measurement method of two-dimensional velocity vectors was developed using a high speed VTR and image processing system. The visualized turbulent flow with tracer is tracked by the high speed camera and the image data is sent to the image processor. The mean velocity vectors are automatically obtained by the cross-correlation calculation of tracer concentration signals between two points on the image. Applicability of the method was investigated in the velocity vectors measurements of an axisymmetric turbulent free jet and normal impingement of the jet. As a result, it was found that the measurement of higher velocity was possible by reducing data sampling interval Δt . And the measured velocity vectors of the impinging jet showed a good agreement with the other calculation and experimental results.

1. まえがき

画像処理による流速測定手法は、非接触で空間的な測定が可能であり、一度システムを構築すれば比較的容易に自動計測を行うことができる等の優れた特徴があるため最近盛んに開発が試みられている。これまでに報告された手法は、個々のトレーサ挙動を追跡するもの(1)(2)、画像上の輝度パターンから相関計算により求めるもの(3)がほとんどであるが、いずれの手法も画像取り込みスピードの制約や粒子間の対応付けが困難になる等の理由から低レイノルズ数の比較的低い流速の流れ場を対象としている。しかし、一般に工学上対象とすべき流れ場の多くは高レイノルズ数の乱流であり、これらの場へ適用するためには、比較的高い流速に対しても測定可能な手法を開発する必要がある。

本研究では、高速VTRを用いて画像取り込み間隔を短縮することによって比較的高い流速(水流で1m/s以上)にも適用可能な2次元速度ベクトルの自動計測システムを開発し、乱流場に適用して従来の実験及び計算結果との比較検討を行った。

2. 計測システム及び計測方法

図1に速度ベクトル計測原理を示す。連続的に取り込んだ複数の画像データより画像上に設定した2点A,Bにおける輝度信号の経時変化を求め、二つの信号の相互相関係数が最大となる遅れ時間 τ_m を算出する。平均流速 $\bar{u}$ は、2点間距離 L と τ_m から求める。流れ方向は、A点を固定しB点を回転させることにより回転角度 θ に対する最大相関係数 R_{max} の変化を調べそれが最大となる角度から決定した。 R_{max} のピークは流れ方向が全く逆(180° の角度差)でも現れるが、この場合 τ_m が負の値となるので区別できる。回転させる角度の最小単位は、測定対象のスケールを考慮し $\Delta\theta = 3^\circ$ とした。したがって、画像上のある位置における速度ベクトルを求めるのにA,B間の相関計算を120回行うことになる。

実験装置及び計測システムの概略を図2に示す。所定流量に設定された水流は、一定量

*New Energy Department, Yokosuka Research Laboratory, Central Research Institute of Electric Power Industry, 2-6-1 Nagatsaka, Yokosuka-shi, Kanagawa, 240-01

のトレーサとともにアクリル製水槽内に流入する。本研究では、軸対称乱流自由噴流およびその垂直衝突に対して計測を行ったので水槽底部にノズル(出口内径 $d=13\text{mm}$)を設置した。流れは光源(キセノンランプ)から照射されたスリット光線(幅 7mm)により可視化され、高速ビデオカメラで撮影(100画面/秒)した画像をビデオ収録器に記録する。再生された画像信号は、リアルタイムでA/D変換され $\Delta t=10\text{msec}$ の間隔で約500枚分がイメージメモリに格納される。ただし、所要メモリ数を少なくするため測定対象に応じて取り込み画像の大きさをできるだけ小さく取

るようにした。さらに、前述の処理・計算を画像処理装置(NEXUS6400)および計算機(HP9000MODEL840)が行い結果を出力する。これら一連の処理はすべて自動で行われる。トレーサには中空ガラス微粒子(平均粒径: $50\mu\text{m}$, 比重: 0.983)を用いた。予備検討の結果、トレーサの濃度および注入方法のちがいが測定結果に及ぼす影響は極めて小さいことがわかった。したがって、本手法では比較的容易に適切な測定用画像データを得ることができる。

3. 実験結果および考察

3.1 流速測定可能範囲

本手法を軸対称噴流(ノズル出口平均流速 $\bar{U}_0=5\text{m/s}$, $Re=65000$)に適用し中心軸上の軸方向平均速度を求めた。中心軸上に測定点A, Bを固定し、2点の間接をもって流速測定位置のx座標とした。図3に2点AB間の距離Lと遅れ時間 τ_m との関係を示す。図において直線の傾きが平均流速を表している。各プロット点はほぼ直線に沿っており流速測定結果がLにほとんど影響されないことがわかる。ただし、Lが小さすぎて遅れ時間 τ_m (流体がAB間を通過するのに要する時間)がサンプリング間隔 Δt (10msec)よりも小さくなると、原理的に測定は困難である。実際、その場合 τ_m の計算結果が極端に低くなり測定できないことがわかった。したがって本手法を流れ場に適

Fig.1 Measurement method of velocity vectors

Fig.2 Experimental apparatus and measurement system

Fig.3 Relationship between Delay time τ_m and Distance L

用する場合、 τ_m の算出結果が Δt より大きくなるように L を設定する必要がある。参考に $\Delta t=33\text{msec}$ (通常のITVカメラを使用)の場合の結果も図中に示した。同じ L に対して測定可能領域が Δt を短縮したことによって拡大されていることがわかる。図4は、中心軸上の流速 U_m の測定値と従来の実験式との比較を示したものである。また、速度分布測定結果を従来の実験値(4)(5)および計算値(6)(7)と比較して図5に示す。いずれも L は遅れ時間 τ_m が Δt より大きくなるように適宜設定した。本手法の測定値と従来の結果はよく一致しており、 2.3m/s の流速まで測定できることを確認した。 L が大きすぎると測定の局所性が薄れるとともに得られる相関が弱くなるため、本測定対象においては $L=30\sim 40\text{mm}$ までが適当であると考えられる。 $L=30\text{mm}$ の場合、流速測定可能範囲は約 3m/s までとなる。

3.2 速度ベクトルの測定

前述の手法により流れ方向が決定できるかどうかを確認するため、図6に示すような整流したダクト内の流れを用いて最大相関係数 $R_{\max}$ の回転角度 θ に対する変化を調べた。測定部は $80\text{mm}\times 80\text{mm}$ 、平均断面流速 $U_0=0.4\text{m/s}$ である。図7に最大相関係数 $R_{\max}$ と回転角度 θ との関係を示す。 $R_{\max}$ は、流れ方向に対し $\pm 3^\circ$ の範囲でピークを取っており、実用上十分な精度で流れ方向を決定できることがわかった。

本手法を軸対称噴流の垂直衝突に適用し速度ベクトルを求めた。図8に示すように $x/d=24.4$ の位置にアクリル製板($300\text{mm}\times 300\text{mm}$)を設置し、破線で示した衝突領

Fig. 6 Test section

Fig. 4 Distribution of center-line mean velocity

Fig. 5 Mean velocity profile across the jet

Fig. 7 Variation of $R_{\max}$ with θ

Fig. 8 Impinging jet

Fig. 9 Mean velocity vectors in the impingement region

Fig. 10 Comparison with stream line (calculation)

Fig. 11 Velocity profile in the impingement region

域内を測定した。図9に測定結果を示す。噴流が壁面に衝突することにより流れ方向が大きく変化する様子がわかる。図10は、本測定結果と円能寺、浅沼による流線の計算結果(8)とを比較したもので、多少のバラつきはあるが両者は概ね一致している。また、得られた速度ベクトルから噴流方向(x軸方向)の速度成分を算出し、衝突領域内における速度分布を求めた(図11参照)。各測定値は、円能寺らの実験及び計算結果とよく一致している。 $y/b \approx 1.6$ ではずれているものは主として流れ方向の測定誤差による。以上の結果より、本手法が実際の乱流場に適用でき定量的にもほぼ妥当な計測結果が得られることがわかった。

4. 結論

高速VTRを用いた2次元速度ベクトルの自動測定システムを開発し、乱流場に適用することによって以下の結論を得た。

- (1)画像取り込み間隔の短縮を図ることによって、従来より高い流速の乱流場の測定が可能となった。
- (2)本手法を軸対称衝突噴流に適用した結果、定量的にほぼ妥当な測定結果が得られることがわかった。

終わりに、本研究に御協力を頂いた(株)日本ファーンエス工業 長谷川氏に感謝の意を表す。
 (参考文献)(1)小林ら,機論,55-509,B,pp.107(1989) (2)西野,笠木ら,機論,55-510,B,pp.404(1989) (3)木村ら,計測自動制御学会論文集,23-2,pp.101(1987) (4)Wyganski, I. and Fiedler, H., J. Fluid Mech., 38-3, pp. 577(1969) (5)N. Rajaratnam, 野村訳「噴流」, pp. 42 森北出版(1981) (6)Schlichting, H., "Boundary Layer Theory", pp. 747, McGraw-Hill, New York, 6th edition (7)Tollmien, W., Z.A.M.M., 6, pp. 168(1926) (8)円能寺,浅沼,機論,53-486,B,pp.423(1987)