124 相関法を用いたラグランジュ的計測の乱流場への適用

東工大院 森下和是[○], 東工大工 小林健一, 吉田英生, 越後亮三

Lagrangian visualization of turbulent field by using correlation technique

Kazuyuki MORISHITA*, Ken-ichi P.KOBAYASHI**,
Hideo YOSHIDA**, and Ryozo ECHIGO**

To investigate the evolving process of the large structures in turbulence, image-processing technique for traversing camera at mean flow velocity along the axis of the flow was developed by using cross-correlation technique and applied to the axisymmetric jet. In order to obtain a complete velocity profiles, a traversing unit for CCD was controlled by a personal computer to synchronize its traversing rate with the mean flow. Video signals from the CCD were recorded continuously on VTR with two binary barcode; one for identify the video field, the other for specify the camera position and the traversing rate. From recorded images, the cross-correlation technique was employed to obtain two-dimensional velocity distributions. From successive maps of instantaneous velocity and vorticity distribution, the motion of large eddies (vortex pairing, entrainment) can be dynamically revealed which was unable to measure by fixed camera measuring techniques.

1. 緒言

乱流は完全に不規則な変動を伴う流れと古くは考えられていたが、これまでの研究により、その中にある種の規則的な運動、いわゆる組織的構造を持っていることがわかっている。代表的な乱流場である軸対象噴流は、周囲流体との速度差により強いせん断層を生み、組織的構造（渦）が成長していく。こうした周囲の流体を巻き込み、混合・拡散していく過程を計測・解析することにより、組織的構造のメカニズムが解明できる。このような流れを固定したカメラを用いて計測するためには、空間分解能が低下しないよう画面に収める領域を小さくすると、計測対象が画面内に収まる時間は一瞬であり、渦の成長の過程をとらえるのは困難であった。

そこで、本研究では常にカメラの画面内に渦の成長過程を収めるために、流れの主流方向に混合層の平均速度にてカメラを移動し、その映像を連続的に VTR に記録した。カメラの正確な位置決め及び VTR に記録したフィールドの同定のために、榊原ら⁽¹⁾の開発した手法を応用し画面内にバーコードを入力した。こうして得た、画面をもとに相関法を用いて速度ベクトルを求め、軸対称噴流の組織的構造を可視化することが目的である。

* Graduate School of Tokyo Institute of Technology

** Tokyo Institute of Technology, 2-12-1, Ohokayama, Meguro-ku, Tokyo

2. 実験装置

本研究で用いた噴流実験装置を Fig. 1 に示す。水槽は、底面が $0.35 \times 0.30 [\text{m}^2]$ で高さが $1.0 [\text{m}]$ の内容積を持ち、撮影面以外は、黒く塗りつぶしてある。水槽内の流体には水温 $13.5 [^\circ\text{C}]$ の水道水を用い、トレーサ粒子には、イオン交換樹脂（三菱化学 HP20SS, 比重 $(1.02 \sim 1.04)$, 粒径 $75 \pm 20 [\mu\text{m}]$ ）を使用した。噴流は、内径 $20 [\text{mm}]$ のノズルより出口速度、 $110 [\text{mm/s}]$ にて噴出し、周囲流を流路底部から一様に $0.13 [\text{mm/s}]$ で流した。これらに基づくレイノルズ数は 1900 となる。

Fig. 1 Test section

3. 計測システム

本研究で用いた、流れの主流方向にカメラを移動しながら連続的に計測する装置の全体図を Fig. 2 に示す。

照明には、空冷 Ar イオンレーザを光ファイバにより流路上部へ導き、シリンドリカルレンズを用いて流れに平行な平面で可視化した。測定対象は CCD カメラ（東京電子工業 CS8330）で撮影し、“Bar-code generator”によって、フィールド番号およびカメラ位置の情報を 2 進数のバーコードとして画面にスーパーインポーズし、Hi-8 ビデオ（SONY

Fig. 2 Instrumental setup

CVD-1000) で記録した。バーコードは Fig. 2 内の画面の図のように画面の左隅に記録される。カメラを乗せたスライドはコンピュータ上の “Motor driver” から出るパルス信号によって制御され、カメラの正確な位置決め・速度調節ができるようにした (分解能 5[mm]/1000[pulse])。複数回実験を行ってもバーコードを合わせることで、同一の位置おける画像を取り出すことができる。ビデオに記録された画像は画像処理ボード (ディテクト DIG-AT) でハードディスク上に、512x512 画素、256 階調のデジタルデータとして記録される。速度ベクトルの算出には、相関元領域を 16x16 画素とした相関法を用いた。

4. 不確かさ解析

誤差要因に(1)基準点の誤差、(2)基準点を画像上の点として見たときの誤差、(3)移動量算出に伴う誤差をあげ、114 [mm] / 512 [pixel] において 100 [mm/s] の流速を測定した場合の不確かさの計算結果は、流れ方向に $U_x = \pm 0.808$ [mm/s]、流れと垂直方向に $U_y = \pm 1.096$ [mm/s] となった。

5. 実験結果および考察

Fig. 3 にせん断層に生じた渦が発達していく様子を示す (カメラの移動速度 35[mm/s])。左側は渦度分布 (渦度 0 : 黒 <—> 白 : 渦度大)、右側はラグランジュ的に求めた速度ベクトルである。グラフの縦横の座標の数字はカメラ画面内での pixel 数を表している (1 [pixel] = 0.22[mm])。時間は 番号(1)から(6)に向かって経過しており時間間隔は 1/3 秒である。せん断層に噴流の外側に向かって高い渦度を持つ膨らみが生じる [(1) 内の (170, 380) 付近]。この膨らみは、しだいに軸から離れていき渦を形成する [(2)]。渦はしだいに大きく成長していき、渦度の値も大きくなっていく [(3), (4)] が、噴流出口から離れるに従い、渦は拡散し渦度は小さくなる [(5), (6)]。

次に、Fig. 4 に、同じ回転方向を持つ隣り合う二つの渦が接近し、その後合体する過程を示す。時間は 番号(1)から(6)に向かって経過しており時間間隔は 1/30 秒である。(1)内で見られる二つの渦 [(220, 270)付近と(200, 350)付近] が、時間が経過するとともに [(2)~(6)] 接近し、合体し [(7)]、発達していく様子 [(8), (9)] が可視化されている。

6. 結論

主流方向にカメラを精度良く移動させることによって、従来、ビデオではとらえきれなかった高い空間分解能の噴流の巻き込み現象を可視化し、この手法が、流れの組織的構造のメカニズムを解明することに有効だと確認した。

7. 参考文献

- (1) 榊原ほか, Thermal Science and Engineering, Vol.2, No.4, (1994), 1-9.

Fig. 3 Successive vorticity and velocity maps with 1/3 s time interval.

Fig. 4 Successive vorticity and velocity maps with 1/30 s time interval.