8 線式速度勾配測定用プローブの開発と円柱後流測定への応用

Development of eight-sensor hot wire probe for velocity gradients and its application to measurement of cylinder wake.

○学 齋藤良太 (名工大) 正 牛島達夫 (名工大)
正 鈴木博貴 (名工大) 正 長谷川豊 (名工大)

Ryota SAITO, Nagoya Institute of Technology, Gokiso-cho, Showa-ku, Nagoya-shi, Aichi-ken, 466-8555
Tatsuo USHIJIMA, Nagoya Institute of Technology
Hiroki SUZUKI, Nagoya Institute of Technology
Yutaka HASEGAWA, Nagoya Institute of Technology

We have developed new multi-sensor hot wire probe in order to measure all components of velocity gradient simultaneously. Simultaneous measurement of all components of velocity gradient is important for understanding dynamics of non-linear energy transfer. Our probe uses less sensors (8 wires) than the previously proposed 12-sensor probe so that size of probe can be more compact. The new probe was tested against wake of circular cylinder.

Key Words: multi-sensor hot wire probe, velocity gradient, cylinder wake

1. 結論

自然界の造形は、しばしば自己相似性を保持するフラクタル幾何によって表現される⁽¹⁾。21 世紀になり、このフラクタル形状の物体を通過して生成される乱流の減衰機構が、従来の実験室や乱流理論で説明されていたものと異なっていることが報告されている^{(2), (3)}。一般的に知られている格子乱流では、乱流はエネルギーが大きなスケールから小さなスケールへ順々に輸送されるカスケードによって減衰が起こる。その場合、乱流エネルギーは格子からの距離のほぼ 1 乗に比例して減衰する。ところが、フラクタル形状を持つ格子から生成された乱流は、非常に大きな乱れ速度を示すだけでなく、乱流エネルギーが指数関数的に減衰する場合がある。

3 次元の乱流では、渦度ベクトルが伸張を絶えず受け続けることで、スケール間のエネルギー移動が起こっている。渦度ベクトルが伸張を受けると、粘性の影響がない場合は、伸張によってその周囲の渦管は角運動量を維持しながら細くなり、これにより、エネルギーは大きなスケールから小さなスケールに移動する。これらの機構を明らかにするには、エンストロフィー(渦度の 2 乗)の生成項である $\omega_i s_{ij} \omega_j$ (ω_i は渦度の i 成分, s_{ij} は変形速度テンソルの ij 成分)を知る必要があり、速度勾配テンソルの全 9 成分を同時に測定する必要がある。そこでこのような測定を行うために、本研究では 8 線式の速度勾配測定用熱線プローブの開発を進めている。

熱線流速計は、点計測であるものの、高い時間分解能で乱流の変動を計測することができる。熱線流速計では通常、速度の 1 成分(I 型)または 2 成分(X 型)を測定するが、速度の 3 成分を測定するには、熱線は 3 線または 4 線必要となる。さらに、速度勾配の全 9 成分を測定するためには、9 ないし 12 本の熱線をコルモゴロフ長のオーダの空間に張らなければならない。製作が困難であり、世界では 12 線式⁽⁴⁾、9 線式⁽⁵⁾、8 線式(X 線式 4 本の組み合わせ)⁽⁶⁾など 2, 3 の研究グループが扱うのみである。そこで本研究では 4 組の 3 線式熱線流速計の隣同士の熱線を共有することで、8 線で速度勾配テンソルを測定できる熱線流速計を製作した(Fig.1)。熱線の本数を少なくすることで、製作が簡単になり、さらにコンパクトに製作することが可能となり、微小スケールでの乱流のエネルギー輸送機構を実験的に明らかにできる。本研究ではこの 8 線式プローブを製作し、円柱後流の流れを測定し、過去の研究と比較することで、このプローブの動作を確認することが目的である。

Fig.1 Eight-sensor hot wire probe

2. 実験装置及び実験方法

実験装置は、一様な流れが確認されている口径が 130mm × 130mm の風洞を用いる。座標系は直交座標系を用い、縮流部出口の流路中央を原点とし、流れ方向を x 、スパン方向を y 、高さ方向を z とする。8 線式プローブの検定は縮流部出口から 50mm 後方において行う。円柱後流測定では設定流速 $U_\infty=5\text{m/s}$ とし、縮流部出口に直径 $d=5\text{mm}$ の円柱を y 軸に沿って設置する。測定点は $x/d=50, 100$ の 2 箇所、高さ方向に 2mm 刻みにトラバースして測定を行った。

8 線式プローブ(Fig.1)については、プロング間の感知部長さ 0.7mm、熱線には直径 3.1 μm のタングステン線を用いた。プロングは直径 0.3mm のピアノ線の先端を削り、先端径 0.05mm となったものを使用している。また、8 線式プローブの中央部は高さが横から見て 45°(正面から風を流す場合、中央部の熱線の迎え角はそれぞれ 54.7°)になるように設計した。なお、Fig.1 の下線付きの数字はチャンネル数を示している。

3. 検定方法

8 線式プローブの検定は従来の 3 線式プローブと同様の手順で行う。8 線式プローブの方向感受性は、プローブの角度 ϕ (回転角)と流れ方向に対する角度 ψ (ヨー角)の両方で特徴づけられる。本研究の検定ではヨー角 $\psi=-5^\circ, 0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$ (6 点)においてそれぞれ、回転角 $\phi=0^\circ\sim 360^\circ$ の範囲で 15° 刻み(24 点)で行う。これらの座標系を Fig.2 に示す。

Fig.2 Coordinate system

Fig.3, Fig.4 に設定流速 $U=6\text{m/s}$ の場合の検定結果の一例を示す. Fig.3 は ch.1, 2, 5 の熱線を $\psi=10^\circ$ において 8 線式プローブを $\varphi=0^\circ\sim 360^\circ$ (横軸) に回転させた場合の電圧 $E[\text{V}]$ (縦軸) の変化を示す. Fig.4 は ch.1, 2 の熱線について, $\psi=0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ において $\varphi=0^\circ\sim 360^\circ$ に回転させた場合の, ch.1 の電圧 $E_1[\text{V}]$ (横軸) と ch.2 の電圧 $E_2[\text{V}]$ (縦軸) の変化を示す. なお, 放射線状に広がる黒色の線は回転角 φ が同じ点で結んだ.

Fig.3 Calibration curve (E vs. φ)

Fig.4 Calibration curve (E_1 vs. E_2)

電圧から流速を求めるためにはキングの法則

$$E^2 = A\sqrt{U} + B$$

を用いる. このため上記の検定を流速が異なる場合において行う必要がある. 本研究では設定流速 $U_\infty=5\text{m/s}$ のため, 設定流速 $U=4, 6\text{m/s}$ において検定を行った.

4. 実験結果

8 線式プローブの ch.5~8 は通常の I 型プローブとして機能する. この I 型プローブが得られた円柱後流の流れ方向 (x 方向)速度分布と乱流強度分布の一例をそれぞれ Fig.5, Fig.6 に示す. ここで $\bar{U}$ はその位置での平均流速[m/s], U_0 は設定流速 U_∞ からの円柱後流中央 ($y=0$) での速度欠損[m/s]であり, 横軸は半値幅 L で無次元化している.

Fig.5 Velocity distribution ($U_\infty=5\text{m/s}$, $x/d=50$)

Fig.6 Rms velocity distribution ($U_\infty=5\text{m/s}$, $x/d=50$)

5. 結論

乱流の速度勾配テンソルの全 9 成分を実験的に直接測定するために 8 線式プローブを提案し, 実際に作成した. ch.5~8 は I 型プローブとして機能することを利用して, 円柱後流において x 方向の乱流を調査し, 過去の文献と比較しても同様の傾向を示していることが分かった. ch.1~4 を利用した他方向成分については現在分析中である.

引用文献

- (1) Mandelbrot, B., *Fractal Geometry of Nature*, WH Freeman (1982)
- (2) Hurst, D. and Vassilicos, J.C., "Scalings and decay of fractal-generated turbulence", *Phys. Fluids* **19** 035103 (2007)
- (3) Seoud, R.E. and Vassilicos, J.C., "Dissipation and decay of fractal-generated turbulence", *Phys. Fluids* **19** 105108 (2007)
- (4) Vukoslavčević, P. and Wallace, J.M., "A Twelve-sensor Hot Wire Probe to Measure the Velocity and Vorticity Vectors in Turbulent Flow," *Meas. Sci. Tech.* **10** pp. 1451-1461. (1996)
- (5) A. Honkan and Y. Andreopoulos, "Vorticity, strain-rate and dissipation characteristics in the near-wall region of turbulent boundary layers," *J. Fluid Mech.* **350**, 29 (1997).
- (6) Zhou, T, Zhou, Y, Yiu, MW, Chua, L.P., 'Three-dimensional vorticity in the intermediate region of a turbulent cylinder wake', *Exp. Fluids* **35** pp. 459-471. (2003)