302 大迎角を持つ軸対称放物体背後に生じる剥離渦構造の解明

Clarification of The Structure of Separated Vortices over
Axisymmetric Paraboloid at High Angles of Attack

○ 石出忠輝 (木更津高専) 西川進栄 (千葉大工) 三神史彦 (千葉大工)

Tadateru ISHIDE, Kisarazu National College of Technology, 2-11-1, Kiyomidai-higashi, Kisarazu City

Nobuhide NISHIKAWA, Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba City

Fumihiko MIKAMI, Faculty of Engineering, Chiba University, 1-33, Yayoi-cho, Inage-ku, Chiba City

The phenomenon of three-dimensional separation of the flow over a slender body at high angles of attack is difficult to model and still challenging problem. The singularity of the flow is caused by mutual intervention of three-dimensional separation and separated vortices. In this study, the flow in the cross-flow separation region of an axisymmetric paraboloid at 30, 40, and 50 deg angle of attack has been investigated experimentally by hot wire anemometer. The growth of turbulence in separated vortices is discussed by r.m.s. and probability density function of velocity fluctuation in addition to Reynolds stress.

1. 緒言

大きな迎え角をとる有限長さの細長物体まわりの流れは、主として航空・宇宙の分野において多くの実用例があり、実験及び数値解析の両面から研究が進められている。特に宇宙飛行体の回収・着陸には高速のみならず、低速時のデータが必要とされるが、低速時の特性は高速時と比較して複雑であり、迎角、レイノルズ数、頂角など多くのパラメータによって変化する。このような観点から軸対称物体を対象として、三次元剥離位置の幾何学的な定義及びレイノルズ応力、表面摩擦応力の測定による定量的な定義が様々な迎角、レイノルズ数において提案されている¹⁾²⁾³⁾。しかしながら細長物体まわりの流れは、表面の三次元剥離と後流渦との相互干渉により非常に複雑な様相を呈し、空力特性にも著しい特異性を与えると考えられ、これらの現象を合理的に説明する理論は確立されていないのが現状である。本研究では X 型プローブを有する熱線流速計を使用して、軸対称放物体背後の剥離領域の速度場を詳細に測定し、各断面における r.m.s. 分布及びレイノルズ応力分布の算出に加えて、物体表面近傍における確率密度関数を用いた流れの分類を行う事により、剥離渦の乱れの成長過程を明らかにする事を目的としている。

2. 計測システム

本研究では、放物体背後の剥離領域における非定常特性を定量的に求めるために熱線流速計を用いて測定を行う。使用した熱線流速計は KANOMAX IHW-100 であり、定温度流速計モジュール 2 個と温度補正用温度測定モジュールで構成されている。測定箇所は周方向については、 $\theta = 90^\circ \sim 180^\circ$ を 11.25° おきに 8 分割し、さらに著者らが行ってきた可視化実験⁴⁾から判定される二次渦近傍において 2 点追加設定している。また $\theta = 90^\circ$ の y 方向主流領域側に 3mm 間隔で 3 点設定している。x 方向については $x/L = 0.21 \sim 1.0$ (L: 模型全長 140mm) において可視化画像から特長的な断面剥離渦パターンの観察される箇所を測定点としている。また z 方向は物体表面直上 0.5mm を開始点として、主流領域に至るまでの間を 20 分割している。したがって放物体全体にわたる測定点数は 280 となる。プローブは X 型を使用し、各測定点において平均速度ベクトル及び変動強さの算出を行う。本実験におけるサンプリング周波数は 4kHz、サンプリングデータ数は 16384 である。

3. 結果と考察

本研究における実験条件は模型の迎角 $\alpha = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$ 、一様流速 $U_\infty = 1.8, 3.6$ (m/sec) であり、模型後端直径 $D = 75$ mm を代表長さとするレイノルズ数はそれぞれ $Re = 9.0 \times 10^3, 1.8 \times$

10^4 である。Fig.1 に $\alpha = 40^\circ$, $Re = 9.0 \times 10^3$, $x/L = 1.0$ における可視化画像を示す。この画像は著者らが行ってきた可視化実験⁴⁾により得られたものである。この図より背中側対称線から周方向上流側に向けて、主渦、一次渦、二次渦、三次渦が形成されている事が分かる。隣接した渦の回転方向は逆転しており、一次剥離線から剥離した流れと背中側対称線からの再付着流れによって主渦が形成された後、各縦渦が相互干渉的に生成されるものと考えられる。

3.1 r.m.s. 分布

Fig.2 に $\alpha = 40^\circ$, $Re = 9.0 \times 10^3$ における y 方向速度成分 v の r.m.s. 分布を示す。なおこの図における r.m.s. 値は、一様流速 U_∞ で無次元化している。x 方向速度成分 u、z 方向速度成分 w についても同様の傾向を示している。この図から各断面共に Fig.1 における二次渦領域において最大値を示している事が確認できる。また一次渦から主渦の渦核に至る領域は、二次渦領域に次いで高い値を示している。等値線が密になっている部分に着目すると、物体後方における剥離渦領域の拡大が観察できる。

3.2 確率密度関数を用いた剥離渦の分類

前述の r.m.s. 分布では、速度変動の周波数が低い場合においても、変動の振幅が大きいと値が大きくなってしまいう可能性が考えられる。そこで本研究では確率密度関数を導入し、物体表面近傍の剥離渦の流れの分類を試みた。すなわち各測定点において 16384 のサンプリングデータから確率密度関数 R_1 を算出し、この時得られる試料標準偏差 σ から正規分布 R_2 を求め、次式の評価関数 Dfn を導入する。

$$Dfn = \int_{v_1}^{v_2} (R_1 - R_2)^2 dv \quad (1)$$

Fig.1 Flow visualization over axisymmetric paraboloid ($\alpha = 40^\circ$, $Re = 9.0 \times 10^3$)

Fig.2 r.m.s. distribution in each cross section ($\alpha=40^\circ$, $Re=9.0 \times 10^3$)

Fig.3 ($rms \times Dfn$) distribution in each cross section ($\alpha=40^\circ$, $Re=9.0 \times 10^3$)

v_1 , v_2 は各測定点における速度データの最小及び最大値である。本研究では r.m.s. 値と Dfn の積である ($rms \times Dfn$) に着目し、周波数の低いうねり成分を持ち r.m.s. 値の高い領域の抽出を試みる。Fig.3 に $\alpha=40^\circ$, $Re=9.0 \times 10^3$ における各断面の ($rms \times Dfn$) の等値線図を示す。 $x/L=0.64 \sim 0.79$ の一次渦及び二次渦領域において値が高くなっている事が確認できる。これらの領域の確率密度関数の分布形状は、いずれの場合も正規分布から大きくずれており、低周波数のうねり成分を含んだ形となっている。 $x/L=1.0$ においては値の高い領域が拡大し、等値線の中心位置は物体壁面から遠ざかっており、一次渦及び二次渦の浮き上がり現象が起きているものと考えられる。

4. 結論

(1) 各迎角、レイノルズ数における r.m.s. 分布を詳細に測定し、その結果迎角によって r.m.s. 値が最大となる渦領域は異なる事が確認できた。また各迎角における縦渦群の浮き上がり現象や渦と渦との合体について定量的に確認できた。

さらに r.m.s. 分布の等高線の疎密状態から、渦領域の大きさの変化を捉える事ができた。

(2) 確率密度関数とこれに対応する正規分布及び r.m.s. 値を用いて剥離渦内を評価した結果、 $\alpha=40^\circ$ における一次渦及び二次渦の折れ曲がり及び浮き上がり現象を定量的に説明する事が可能となった。

5. 参考文献

- 1) H.U.Meier and H.P.Kreplin : Experimental Investigation of the Boundary Layer Transition and Separation on a Body of Revolution, Z.Flugwiss. Weltraumforsch. 4, Heft2(1980), pp.65
- 2) C.J.Chesnakas and R.L.Simpson : Full three-dimensional measurements of the cross-flow separation region of a 6:1 prolate spheroid, Experiments in Fluids 17(1994), pp.68
- 3) T.G.Wetzel and R.L.Simpson : Measurement of Three-Dimensional Crossflow Separation, AIAA Journal, Vol.36, No.4(1998), pp.557
- 4) 石出、西川、三神: 三次元境界層剥離の可視化と熱線計測、日本航空宇宙学会論文集、Vol.48, No.553(2000), pp.27