C341

はく離の捕捉

Detection of Separation

○貴家 伸尋(北大工),望月 修(北大工),木谷 勝(北大工),石川 仁(北大工)

Nobuhiro SASUGA*, Osamu MOCHIZUKI*, Masaru KIYA* and Hitoshi ISHIKAWA* *Dept. of Mech. Eng., Hokkaido University, Sapporo 060-8628, Japan

In view of industrial application, it is important to detect of the separation. In the case of circular cylinder, The point of inflection of the pressure distribution shows the point of separation. The pressure distribution in the diffuser has been experimentally investigated. The pressure distribution has the inflection point when the diffuser half angle was varied with both dynamically and statically. We proposed the method of detecting the separation by means of pressure distribution.

1. はじめに

物体表面においてはく離が発生すると、抗力が増し、航空機の翼な どでは揚力の低下を招き非常に危険である.そのため、はく離の発生 する時期を予測し、はく離を制御することは工学的に非常に重要であ る.はく離点は、境界層内の速度勾配が物体表面上で零として定義さ れる.このため、はく離点を捉えるには、境界層内の速度分布を測定 する必要がある.しかし、物体表面全体にわたって熱線流速計で境界 層内の速度分布を測定することは困難である.それに対し、物体表面 に圧力センサを埋め込み、圧力を測定することは比較的容易である. そこで、本研究では物体表面上の圧力分布に着目し、流れ方向の圧 力勾配からはく離を捕捉することを試みる.まず、過去行われた円柱 のはく離点についての研究を考察し、それをもとに開き角が動的に変 化するディフューザの壁面圧力を測定し、はく離点を求めた.

2. 円柱におけるはく離点および圧力勾配に関する考察

2.1 円柱の圧力分布とはく離点

過去の円柱における圧力分布の測定結果 ^{0,20}をもとに、その圧力係 数を多項式近似し、円周方向の勾配 *dCp/dθ* を調べた結果を図1に 示す、図中の S ははく離点を示し、そのとき圧力勾配が極値をとること がわかる、つまり、圧力分布の変曲点をはく離点として規定している、

2.2 圧力勾配のある境界層の解析

Pohlhausen³⁰は運動量方程式から圧力勾配のある境界層の性質を 近似的に解析した. それによれば, 形状係数 Aを境界層外のポテン シャル流の速度 U, 境界層厚さδを使い

$$\Lambda = \frac{\delta^2 dU}{v dx} = -\frac{dp \delta^2}{dx \mu U}$$
(2.1)

と定義し、境界層内の速度分布が

$$\frac{u}{U} = (2\eta - 2\eta^3 + \eta^4) + \frac{\Lambda}{6}(\eta - 3\eta^2 + 3\eta^3 - \eta^4) \quad (2.2)$$

と表されると仮定した. ここで、 $\eta = y/\delta$ である. はく離点では y = 0 で du/dy = 0 であることから、 $\Lambda = -12$ のときはく離点となるとした. し たがって、このときの圧力勾配は

$$\frac{dp}{dx} = \frac{12\mu U}{\delta^2} \tag{2.3}$$

日本流体力学会年会 2000 講演論文集 (2000-7)



Fig.1 Pressure coefficient and pressure gradient in circular cylinders, Roshko¹⁾ and Thom²⁾

と表される.

3.実験装置および実験方法

実験にはノズル径 12.5mm×242mm の吹き出し型風洞を使用した. ディフューザは図2のような入り口高さ H=12.5mm, 幅 W=242mm,長さ L=200mm の片開き2次元ディフューザであり、入り口におけるアスペ クト比 W/H=19.36 である.非定常はく離を生じさせるため片側の壁面 はモーターにより可動式となっており、 $\theta=0^\circ$ から一定角速度 ω で稼 動させる.可動壁面には $x/H = 2.0 \sim 8.0$ まで 0.5 おきに圧力孔を設 け、可動壁面上の圧力を測定した.主流流速 U_0 は $\theta=0^\circ$ のときの出 口速度とし $U_0=10$ m/s,ディフューザを開くときの角速度は $\omega=1.05 \times$ 10^{-1} rad/s, このとき可動壁後縁の無次元周速度 $S=L\omega/U_0$ は S=2.10× 10^{-3} である.また、ディフューザ入り口高さ Hを代表長さとするレイノ ルズ数は $Re = U_0H/\nu = 8.80 \times 10^3$ ($\nu:$ 動粘性係数)である.壁面稼 動時(非定常時)はサンプリング周波数 10Hz,壁面固定時(定常時)が5 kHzで測定を行った.



4.実験結果および考察

ディフューザを稼動させたときの x/H = 4.0 における開き角 θ に対 する壁面圧力係数 C_p の変化を図 3(a)に示す. C_p は壁面圧力 pと大気 圧 p_0 の差を U_0 における動圧で無次元化したものである. 開き角は時 間によって一定に変化するので、これは C_p の時間変化を表したもの である. ここから直接はく離点を決定することは難しい. そこで、流れ方 向の C_p の変化を見ることにする. しかし、壁面稼動時は圧力の変動 振幅が大きすぎるため、ディフューザを一定の開き角に固定して圧力 を測定し、各開き角での C_p を図 3(b)に示した. これより、定常時と非定 常時では、圧力変動は相似な形をとり、非定常時の圧力変動は準定 常であることがわかる. 次にディフューザを $\theta = 12^\circ$ に固定したときの x 方向の圧力変化を図 4 に示す. ここで、圧力係数を次式のように多 項式近似し、x 方向の圧力勾配を求める.

$$C_{p} = \frac{p - p_{0}}{\rho U_{0}^{2}/2} = -0.32351 - 0.31769 \left(\frac{x}{H}\right) + 0.12916 \left(\frac{x}{H}\right)^{2}$$
$$-0.017118 \left(\frac{x}{H}\right)^{3} + 0.00078646 \left(\frac{x}{H}\right)^{4} \qquad (3.1)$$

同時に Bernoulli の式から計算される理論値も図4に示す.理論値で は圧力勾配が極大値を持たず, *C_p*に変曲点が現れないが, 測定され た圧力変化には明確な変曲点を持つことがわかる. 2.1 節の円柱にお ける考察から, 流れ方向の圧力変化が変曲点をもつ *x/H* = 4.0 付近 がはく離点であると考えられる. ここで, *x/H* = 4.0 における境界層厚 さを測定したところ, およそ 2.25mm であった. 一方, 式 (2.1) および 式 (2.3) より圧力勾配から近似的に求まる境界層厚さは

$$\delta^{2} = \frac{12\mu U}{dp/dx} = \frac{24\nu UH}{U_{0}^{2}} \frac{1}{dCp/d(x/H)}$$
(3.2)

となる. x/H = 4.0 では 1.92mm となり、実際の測定と比較的近い値をとる. よって、この位置をはく離点とすることは妥当である.

次に、ディフューザを稼働させた非定常時に x/H = 4.0 で、いつ はく離が生じるかを調べる. 図 3(b)を見ると $\theta = 12^{\circ}$ のとき、開き 角に対する C_{ρ} の変化が変曲点を持つ. このことから、開き角に対 する C_{ρ} の変化においても変曲点ではく離すると考えられる. ディ フューザを稼動させた非定常時においても、定常時と同様の振舞い をすると仮定するなら、図 3(a)においては $\theta = 14^{\circ}$ 付近ではく離す る可能性がある.

5. 結論

円柱のはく離の場合では円周方向の圧力分布の変曲点がはく離点



Fig 3 Pressure coefficient for θ at x/H = 4.0 (a) unsteady state, (b) steady state



Fig 4 Measured and theoretical pressure coefficient and pressure gradient for x/H at steady state $\theta = 12^{\circ}$

と規定された.本研究ではディフューザのはく離においても同様に 流れ方向の圧力分布が変曲点を持ち,その点がはく離点であること を明らかにした.

また,定常時においてディフューザの任意の位置での開き角に対 する圧力の変化において変曲点の現れる角度のとき,その位置にはく 離点が存在することがわかった.工学的応用を考えた場合,図 3(a)の ような圧力の時間変化からはく離を規定することが望まれるが,このよ うな場合でも変曲点が現れる角度にはく離点が存在する可能性を示し た.

引用文献

- 1) Roshko, A.: J. Fluid Mech. 10(1960)350
- 2) Thom, A.: Proceedings Royal Society A141(1933)651-669
- 3) Pohlhausen, K: Zeitschriff für angewandte Mathematik und Mechanik 1(1921)252-268