円柱周辺流動のスパン方向特性に対する端板効果*

山 田 英 巳*¹Effects of End Plates on Spanwise Characteristics
of Flow around a Circular Cylinder

Hidemi YAMADA

Effects of both the diameter ratio D/d and the aspect ratio L/d of a pair of circular end plates on the spanwise characteristics of flow around a circular cylinder were examined experimentally at a Reynolds number of 3000. D/d , which indicates the ratio of end-plate diameter to cylinder diameter, was altered from 4 to 15, and L/d , which denotes the effective aspect ratio of circular cylinder given by the interval between two end plates, was in a range below 60. The experimental results reveal the following: The base pressure of the cylinder with end plates of a suitable diameter ratio becomes constant in a wide region of cylinder span between two end plates. The spanwise range in which the base pressure is uniform is smaller in the case of diameter ratios $D/d=4$ and 15 than in the case of a suitable ratio. The base pressure coefficients in the center of span of all the cylinders with end plates of $D/d=4\sim 15$ become constant for aspect ratios beyond $L/d=30$. Furthermore, the base pressure coefficient of the cylinder with end plates of the most suitable diameter ratio $D/d=8$, becomes constant for small aspect ratios until about $L/d=8$. The minimum limit of aspect ratios in which the Strouhal number in the center of span maintains a value of 0.21 is smaller in the case of $D/d=8$ than in the cases of other diameter ratios.

Key Words: Wake, Flow Measurements, Circular Cylinder, End Plate, Base Pressure, Vortex Shedding, Spanwise Characteristics

1. ま え が き

円柱などの柱状物体周りの流れに関する実験的研究において、これを支持する側壁面上の境界層の影響を低減させ流れのスパン方向の一様性を確保するため、柱状物体の両端部に各種の端板が取付けられる場合が多く存在する。

しかしながら、 $10^3\sim 10^5$ 程度の亜臨界レイノルズ数範囲においてなされた各種端板に関する従来の研究結果^{(1)~(4)}は相互に一致しない点も多く、柱状物体周りの時間平均流れのスパン方向特性に及ぼす端板効果はまだ十分把握されていない。Stansby⁽¹⁾は、く形流路中にあるアスペクト比が20の円柱の背圧係数がスパン方向に大きく変化すること、およびく形端板の装着により背圧係数がスパン方向の広い範囲で一様化されるとともに、その値が最大約30%低下することを報告した。Westら⁽²⁾はく形端板を装着した円柱のスパン中心の背圧および抗力係数がアスペクト比を40にまで拡大してもまだ若干変化することを指摘している。これに対し、Toyら⁽³⁾は角柱のアスペクト比が15以上であれば少なくともスパン中心の背圧係数はアスペ

クト比が十分大きい場合と同一の一定値をとることを示している。両者の相違は、供試柱状物体の形状が円柱と角柱とで異なるため、あるいは装着された端板寸法の影響⁽⁴⁾によるものと考えざるをえない。

このように、柱状物体周りの流れ特性は端板寸法および端板間のアスペクト比の両者に大きく依存するものと推察されるが、これまでの研究ではこの両者のうちいずれか一方のみの影響が取扱われるにとどまり、両者の影響の相互関係および流れ特性のスパン方向変化についてはほとんど言及されていない。したがって、最適な端板形状や端板寸法および必要とされるアスペクト比の最小値などの条件を見いだすには、種々の形状の端板と柱状物体の組合せに対して端板寸法およびアスペクト比の系統的な変化のもとで柱状物体周辺流動のスパン方向分布を明らかにする実験が必要であると思われる。

以上の点を踏まえて、まず本研究では円形端板を有する円柱周りの流れを取り上げ、円柱の背圧係数および渦放出などのスパン方向特性に及ぼす円形端板の直径比およびアスペクト比の影響を明らかにすることを目的とする。

* 原稿受付 平成4年1月20日。

*¹正員、山口大学工学部(〒755 宇部市常盤台 2557)。

2. 実験装置および方法

実験には、入口断面が210 mm×400 mm、長さが1210 mmの測定部を有する吹出し形風洞を用いた。図1は測定部断面における実験概要と主要記号を示す。供試円柱は、直径 $d_p=0.32$ mmの圧力孔を有する直径 $d=5$ mmの黄銅製円管で、測定部入口から800 mm下流断面の中央に水平に設置される。円柱を支持する両側壁面上の乱流境界層厚さは約60 mmである。したがって、本研究では、円柱直径に対する側壁間距離および側壁面境界層厚さの値は一定値に固定されており、そのため側壁面境界層の影響については直接言及しないものとする。

供試円形端板は、図2に示すように角部が丸められた頂角 23° のくさび形の縁をもつ厚さ1.5 mmの黄銅製円板で、円柱のスペン中心から対称の位置に間隔 L を隔てて円柱軸と直角に取付けられる。円形端板の直径比は $D/d=4, 6, 8, 10$ および15に変化させた。またアスペクト比は $L/d \leq 60$ の範囲で種々変化させたが、その際端板は $L/d=60$ の場合を除くと円柱上流の近寄り流れが一樣流である範囲内に位置する。実験は、零圧力こう配のもとでレイノルズ数を $Re=U_1 d/\nu=3 \times 10^3$ の一定(U_1 は主流速度、 ν は動粘度)に保って行った。この際主流の乱れ強さは0.4%であった。なお端板間の間隔がある臨界値以下に狭まると円柱周りの流れ場が大きく変化する現象⁽⁵⁾が現れるが、本研究ではこの現象の詳細は取扱わないこととする。

円柱表面圧力 P の測定にはゲッチェンゲン形微圧計を、後流の平均速度 U の測定にはI形熱線流速計シ

図1 実験概要と主要記号

図2 端板詳細

ステムを、速度変動 u' のパワースペクトル $E(f)$ 分布の測定にはFFTアナライザ(A & D, AD-3525)を使用した。背圧係数 $C_{pb}=(P_b-P_1)/(\rho U_1^2/2)$ および平均速度 U/U_1 の計測偏り誤差は1.5%程度と見積もられる(P_b は背面圧力、 P_1 は主流静圧、 ρ は空気密度)。なお z 方向に関する局所の圧力抗力係数 C_d は、円柱表面の圧力孔の直径 d_p の寸法効果を考慮した修正式⁽⁶⁾

$$C_d = \int_0^\pi C_p \cdot \cos \theta d\theta - 0.625 (d_p/d)$$

より算出した(θ はよどみ点からの角度)。

3. 実験結果および考察

3.1 表面圧力分布 図3および図4は、それぞれ端板を装着しない場合における背圧係数 C_{pb} および局所圧力抗力係数 C_d のスペン(z)方向分布を示す。 C_{pb} は z 方向に一定ではなく、Stansby⁽¹⁾およびToy⁽³⁾らの示すようにスペン中央部で低くおおむね側壁面に向かうにつれ増加する傾向をとる。また側壁面上の境界層領域にあたる約 $z/d \geq 30$ の範囲では特有の起伏を示す。一方、 C_d は C_{pb} のスペン方向変化にほぼ対応して、スペン中央部でほぼ一定、およそ $z/d=22$ で極小値、 $z/d=28$ で極大値をとる傾向を示す。スペン中央部における圧力抗力係数 C_d は、レイノルズ数 $Re=3 \times 10^3$ におけるWieselsberger⁽⁷⁾による全抗力係数 C_D から摩擦抗力係数⁽⁸⁾ $C_f=4/Re^{1/2}$ を差引いて得られる圧力抗力係数($C_d=0.91$)にかなり近い。これは、本実験の側壁間のアスペクト比が80とかなり大きいためと考えられ、また図3に示すスペン中央部における背圧係数 C_{pb} が端板を装着した場合の背圧係数(図5, 6)に極めて近いことにも対応する。しかし

図3 背圧係数のスペン方向分布(端板なし)

図4 局所圧力抗力係数のスペン方向分布(端板なし)

ながら端板を装着した場合の背圧係数は装着しない場合よりわずかに低い値で一定となる(図3)ので、少なくともスペン中央部における圧力抗力係数は端板を装着しない場合より若干大きくなるものと推察される。例えば図5, 6において z/d および L/d の広い範囲で C_{pb} の一定値をとる $D/d=8$ 端板の場合、スペン中心の圧力抗力係数は $C_d=0.92$ であった(図4)。この値は $Re=3\times 10^3$ におけるWieselsbergerによる圧力抗力係数よりわずかに大きい。

図5は、 $D/d=4\sim 15$ の直径比の端板の装着によりアスペクト比を $L/d=20, 40$ および 60 とした場合の背圧係数 C_{pb} のスペン方向分布を示す。アスペクト比の大きい $L/d=60$ の場合、 $D/d=6\sim 10$ の端板における背圧係数 C_{pb} はスペン方向の広い範囲でほぼ一定値を示す。しかし $D/d=4$ の端板においては図5中破線の端板のない場合の傾向が残っており端板直径が

十分ではなく、一方 $D/d=15$ の端板においては端板に近づくにつれ端板自身による背圧上昇が現れており、端板直径が若干大きすぎるものと考えられる。 $L/d=40$ の場合、端板近くでの背圧上昇が大きくなっているが、その影響はスペン中央部までは及んでいない。しかし $L/d=20$ の場合、 $D/d=8$ の端板を除いてスペン中央部付近にまで背圧上昇の領域が近づいている。以上のことより、 $D/d=6\sim 10$ の端板の装着により比較的大きいアスペクト比(約 $L/d\geq 40$)が確保された場合背圧係数はスペン方向の広い範囲で一定値をとること、特に $D/d=8$ 端板が装着された場合かなり小さいアスペクト比まで背圧係数の一様分布が得られることがわかる。

図6は、端板間内の円柱のアスペクト比 L/d に対するスペン中心の背圧係数 C_{pb} の変化を各直径比の端板について示したものである。およそ $L/d\geq 30$ の範囲ではどの直径の端板の場合もスペン中心の背圧係数は、端板を装着しない場合より低い一定値をとり、その値が互いにほぼ等しいことがわかる。 $L/d=30$ より L/d が減少するにつれ背圧の上昇が始まるが、 $D/d=6\sim 10$ の範囲にある端板の場合 $L/d=8$ 程度までその上昇はわずかである。このような $D/d=6\sim 10$ の端板における特徴はToyら⁽³⁾の結果とおおむね一致する。また $D/d=10$ 端板における $L/d=4$ の場合に代表されるように、両側の端板が接近すると2種類の背圧係数が測定される。それより小さい L/d の範囲で背圧は著しく上昇している。これは2枚の端板が近接する場合に見られるジャンプ現象⁽⁵⁾で、他の D/d

図5 背圧係数のスペン方向分布

図6 スペン中心における背圧係数の変化

図7 後流中心($y/d=0$)における平均速度のスペン方向分布

の場合にも認められる。本現象の発生因およびジャンプの臨界条件などの説明は今後の課題であり、その詳細については本報告では言及しないこととする。以上より、 $D/d=4\sim 15$ の円形端板の装着により少なくともスペン中央部における背圧係数 C_{pb} はアスペクト比が $L/d=30$ 以上あれば十分大きい L/d の場合と同一の値をとり、さらに $D/d=8$ 端板のように端板寸法が適当であれば同一の C_{pb} を維持するアスペクト比の最小値は $L/d=8$ 程度にまで小さくできるものと考えられる。

3・2 速度分布 図7は、 $D/d=4\sim 15$ の端板の装着によりアスペクト比を $L/d=20, 40$ および 60 とした場合における $x/d=10$ 位置の後流中心 ($y/d=0$) の平均速度のスペン方向分布を示す。 $D/d=15$ 端板の場合を見ると、速度分布は $L/d=20$ のとき破線で示された端板下流の位置 $z/d=10$ で最小値をとり、同位置に関してほぼ対称となるのがわかる。 $L/d=20$ より端板間隔が広がるにつれ端板位置より側壁面側の速度が側壁面境界層の影響により低下する。この側壁面側の速度低下の傾向は他の D/d の場合にも見られ

る。端板直径が $D/d=15$ より小さくなるにつれ、端板による後流の最大欠損速度は減少しつつその位置がスペン中心方向に移動するのがわかる。これは、円柱背面での圧力こう配(図3)のため生じた、後流中心面上における側壁面側からスペン中心に向かう二次流れの存在を示唆するとともに、直径比の小さい端板の場合これを十分阻止できないことを示す。しかしながら、端板間内領域の速度のスペン方向分布は、背圧係数分布(図5)と対照的に端板の位置から $5d$ 程度までの端板近傍領域を除くと D/d および L/d によらずほぼ一定値を示す。これは、速度分布の測定位置が円柱よりかなり下流の主流方向速度の大きい領域にあるので二次流れの寄与が弱くなっているためと考えられる。また L/d が小さくなるにつれ $L/d=20$ の場合に見られるように端板間内の一様速度の領域はかなり小さくなる。

3・3 渦放出挙動 図8は、端板を装着しない場合に $x/d=10, y/d=0.8$ 位置で測定された円柱後流の速度変動のパワースペクトル分布のスペン方向変化を示す。およそ $z/d \leq 20$ の範囲では明りょうにストロー数 $St=f_p \cdot d/U_1=0.21$ に対応する卓越周波数 f_p が見られ、 $z/d=20$ を超えると f_p の値はしだいに減少し始め、さらに側壁面の近傍になると卓越周波数は認められなくなる。一方卓越周波数 f_p におけるパワースペクトルの値(以後卓越スペクトルと呼ぶ)は z/d の増加につれ連続的に低下している。図9(a)~(c)は、 $L/d=40$ に対してそれぞれ $D/d=4, 8$ および 15 の端板を装着した場合の変動速度のパワースペクトル分布のスペン方向変化を示す。端板間内領域のスペン方向の全領域で D/d によらずストロー数 $St \approx 0.21$ に相当するただ一つの卓越周波数 f_p が存在し、上述の端板を装着しない場合のような f_p の低下は認

図8 パワースペクトル分布のスペン方向分布 (端板なし)

図9 パワースペクトル分布のスペン方向分布 ($L/d=40$)

図 10 ストローハル数のスパン方向分布 ($L/d=60$, $D/d=8$)

図 11 スパン中心におけるストローハル数の変化

められない。さらに図 10 に例示するように他の L/d の場合にも端板を装着しない場合に比べ明らかに St はスパン方向に一定となっている。これは端板の装着により放出渦構造のスパン方向の均一化が促進されたことを意味する。ただ端板を装着した場合にも D/d によらず卓越スペクトルはスパン中心から端板位置に向かって減少する傾向を示す。この卓越スペクトルの z 方向への減少は $D/d=8$ の場合に最も緩やかであり、 $D/d=15$ の場合に最も急になっている。これより背圧係数のスパン方向分布の場合と同様に $D/d=15$ の場合端板直径が大きすぎることが推察される。

次にアスペクト比 L/d の減少に対する渦放出挙動の変化を調べるため、スパン中心におけるストローハル数 $St = f_p \cdot d / U_1$ を測定した。その結果を図 11 に示す。ストローハル数は、図 6 の背圧係数の場合よりかなり小さい L/d の範囲までほぼ 0.21 の一定値を示している。およそ $L/d \leq 10$ の範囲になると D/d の値により若干 St の低下が見られる。図を略したが図 11 中の $L/d \geq 12$ の範囲のパワースペクトル分布は D/d によらず卓越周波数域に同様の鋭いピークを有している。しかし $L/d=8$ の場合のパワースペクトル分布は図 12 に示すように D/d によりかなり異なっている。 $D/d=4, 6$ 端板の場合卓越周波数は明りょうでなく、卓越周波数の認められる $D/d \geq 8$ の範囲の端板では $D/d=8$ 端板の卓越スペクトルが最大であることがわ

図 12 スパン中心における後流のパワースペクトル分布の比較 ($L/d=8$)

かる。ただ $D/d \geq 8$ の範囲の卓越スペクトルは、図 9 のスパン中心のスペクトル分布からわかるように、 $L/d \geq 12$ の範囲の卓越スペクトルに比べ著しく低下している。以上より、端板の装着は円柱からの放出渦構造のスパン方向の均一化を促進する効果を有しており、その効果は $D/d=8$ の端板において最大であるといえる。

なお背圧係数、抗力係数および渦放出挙動の時間平均特性を支配すると考えられる円柱背後の再循環流領域の下流方向長さ l はレイノルズ数に存在する⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾ので、最適な端板の直径比はレイノルズ数により異なるものと考えられる。 l の変化を考慮して本実験における $Re=3 \times 10^3$ の結果を参照すると、亜臨界レイノルズ数領域における最適な端板の直径比は $50 \leq Re \leq 3 \times 10^3$ の範囲では $D/d=8$ より大きく $Re=10^3$ のとき約 $D/d=10$ 程度に、 $Re \geq 3 \times 10^3$ の範囲では $D/d=8$ より小さく $Re=10^4$ のとき約 $D/d=6$ 程度になるものと予測される。

4. 結 論

円柱の表面圧力分布と放出渦挙動のスパン方向特性に及ぼす円形端板の直径比 D/d とアスペクト比 L/d の効果を $Re=3 \times 10^3$ のもとで調べ、以下の点を明らかにした。

(1) $D/d=6 \sim 10$ の端板の装着により比較的大きいアスペクト比 (約 $L/d \geq 40$) が確保された場合、背圧係数はスパン方向の広い範囲で一定値を示す。特に $D/d=8$ 端板を装着した場合、かなり小さいアスペクト比まで背圧係数の一様分布が得られる。

(2) スパン中央部における背圧係数 C_{pb} は、 $D/d=4 \sim 15$ の円形端板の装着により少なくともアスペクト比が $L/d=30$ 以上あれば十分大きい L/d の場合と同一の値をとり、さらに $D/d=8$ 端板のように端板寸法が適当であれば同一の C_{pb} を維持するアスペクト比の最小値は $L/d=8$ 程度にまで小さくできる。

(3) $D/d=4 \sim 15$ 端板の装着は円柱からの放出渦

構造のスパン方向の均一化を促進する効果を有し、それは $D/d=8$ の端板において最大となる。

最後に本研究の遂行にあたり有益なご助言を賜った大坂英雄教授に厚くお礼申し上げる。また実験に協力いただいた川島賢一、岡野卓也ならびに山田誠治の諸氏に感謝する。

文 献

- (1) Stansby, P. K., *Aeronaut. J.*, **78**(1974), 36.
- (2) West, G. S. and Apelt, C. J., *J. Fluid Mech.*, **114**(1982), 361.
- (3) Toy, N. and Fox, T. A., *Exp. Fluids*, **4**(1986), 266.
- (4) Kubo, Y. and Kato, K., *Proc. JSCE*, No. 368/I-5(1986), 179.
- (5) 山田・大坂・岡野, 山口大学工学部研究報告, **39**-2(1990), 353.
- (6) 八木田・高橋, 機論, **56**-529, B(1990), 2603.
- (7) 例えば, Schlichting, H., *Boundary-Layer Theory*, 7th Ed., (1979), 17, McGraw-Hill.
- (8) Goldstein, S., *Modern Developments in Fluid Dynamics*, II (1957), 425, Oxford.
- (9) 辰野・種子田, 九州大学応用力学研究所所報, **31**(1969), 29.
- (10) 種子田・天本・石井, 九州大学応用力学研究所所報, **36**(1972), 57.