能動境界層制御による高層飛行船の抵抗低減* (カスプによる低減効果)

山村 憲弘^{*1}, 松内 一雄^{*2}, 恩田 昌彦^{*3}
山崎 しのぶ^{*4}, 佐々木 晃^{*5}

Drag Reduction of High Altitude Airships by Active Boundary Layer Control (Effect of a Cusp on the Reduction)

Norihiro YAMAMURA, Kazuo MATSUUCHI, Masahiko ONDA,
Shinobu YAMAZAKI and Akira SASAKI

The aerodynamic character of station-keeping airships at high Reynolds numbers is examined. The boundary layer developing on the surface is sucked by an axial flow fan through a slot located at the rear part of the airship and the sucked gas is blown out as a jet. To know the effect of the cusp two models with and without a cusp attached to the inlet of the suction slot were used. The flow field near the inlet, in particular the pressure on the surface, was measured as the suction discharge was varied. We obtained the form drag by integrating the pressure distribution in a wide range of Reynolds number and of suction discharge. Taking into account the jet thrust and the calculated friction drag, we finally determined the total drag and evaluated the role of the cusp. It was found that the cusp plays an efficient role in reducing the drag.

Key Words: Pressure Distribution, Boundary Layer, Separation, Cusp, Airship

1. は じ め に

現在, 通産省機械技術研究所を中心にして飛行船の持つ特性を生かした, 高層広域観測プラットフォーム, 通称 HALROP (High Altitude Long Range Observational Platform) の研究が行われている⁽¹⁾. この飛行船は, 無人で成層圏に長期間停留し, 気象観測や携帯電話の中継基地等として利用される.

我々はこの HALROP の最適設計のために飛行船縮小模型の設計, 風洞実験による表面圧力分布測定, 非粘性流れの計算とそれをもとにした摩擦抵抗の計算などを行った. この吸い込み境界層制御機能を備えた飛行船については過去に Goldschmied^{(2) (3)}によって研究されている. 設計の概念に関してはこの研究

結果がもとになっている.

実験については境界層制御機能を備えた飛行船模型を用い, 低温変圧風洞で圧力分布測定を行った. この実験では吸い込み境界層制御の形状抵抗への影響を調べることを主な目的としている. 実験に用いた飛行船模型は HALROP-C94, HALROP-C95, HALROP-C96 の3種類がある. HALROP-C94 では境界層制御による圧力分布の変化は見られたが形状抵抗の低減には至らなかった. この原因として船体後部形状に問題があると考え, 吸い込み径の拡大と吸い込み位置直前にカスプ形状を取り入れたのが HALROP-C95 である. HALROP-C96 は吸い込み位置が HALROP-C95 と同じでカスプ形状を用いていない. HALROP-C95 の結果の一部は前報で報告した⁽⁴⁾. 今回はカスプ有り模型 HALROP-C95 とカスプ無し模型 HALROP-C96 の実験結果の比較を中心として効率的な境界層制御とカスプ形状の効果について検討する.

また, 計算では摩擦抵抗を算出するために, 第一段階として特異点法を軸対称物体に適用し非粘性速度分布を求めた. その結果を用いて境界層の計算を行

* 原稿受付 1997年5月22日.

^{*1} 正員, 日産自動車(株) (〒104-0061 東京都中央区銀座6-17-1).

^{*2} 正員, 筑波大学構造工学系 (〒305-8573 つくば市天王台1-1-1).

^{*3} 正員, 工業技術院機械技術研究所 (〒305-0044 つくば市並木1-2).

^{*4} 学生員, 筑波大学大学院.

^{*5} 筑波大学大学院.

った。この計算で、層流は Karman-Pohlhausen の方法、乱流は Head の方法を用いた。

さらに、形状抵抗と摩擦抵抗を合わせて全抵抗を求め、後方ジェットによる推力も算出し、成層圏停留の上で重要なゼロ抵抗の実現について検討した。後方ジェットによる推力とは、スロットから吸い込んだ空気を後方からジェットとして吐き出し推力として利用しようとするものである。また、この場合吸い込み流量とジェット流量は一致する。

2. 実験模型

HALROP-C95 と HALROP-C96 では、基本的な形状はほぼ同じだが、1 つだけ大きな違いがある。それは吸い込み位置直前のカスプ形状の有無である。

Fig.1 Profile of two models

カスプとは鳥の嘴のような鋭く尖った形状でこのカスプ形状を用いた流れの制御に関してはいくつかの報告がある(例えば文献(5)参照)。吸い込み境界層制御には欠かせない要素の一つとして挙げられているが、その形状や周辺の流れについてははっきりしたことは分かっていない。そこでカスプの有無による違いを検討するために、カスプ有り(HALROP-C95)とカスプ無し(HALROP-C96)の船体後部の部品を製作した。本模型では吸い込み直前のカスプ部分は非常に小さく複雑な形状の製作は困難なために midbody 形状の終端で内側に円弧を用いるという単

純な形状を採用している。カスプ無しの形状は静圧孔の位置を全く同じに取れて吸い込み流路内に滑らかにつながるような円弧を採用している。船体後部の形状の比較を図1に示す。

3. 実験方法

実験は表面圧力分布測定実験(本実験)とジェット測定実験(予備実験)がある。本実験では解析で基本となる圧力分布の測定を行い、予備実験は解析の上でパラメータとなる吸い込み流量などの決定のために行われた(本実験の測定方法の詳細については前報⁽⁴⁾を参照)。

Fig.2 Definition of slot width (slot width = 7mm)

吸い込み境界層制御を行う際に、吸い込みスロット部分の幅の違いは、流量や吸い込み流速への影響の他に、吸い込み位置での流れにも大きく影響し、船体表面圧力分布にも違いとして現れる。そこでスロット幅というパラメータを導入する。スロット幅の定義は吸い込み入口の幅ではなく、吸い込み流路の幅とする。例としてスロット幅 7mm の場合での吸い込み位置の拡大図を図2に示す。カスプの有無によって吸い込み入口の幅が大きく異なっているのが分かる。カスプ形状は半径 3mm の円弧を用いているために、流路幅(スロット幅)が同じでも吸い込み入口の幅はカスプ有りの方が 3mm 狭くなる。実験はカスプ有り模型、無し模型の両方において様々なスロット幅、流量で実験を行っているが今回はカスプ無しではスロット幅 4mm、カスプ有りでは 7mm を中心に報告する。

4. 計 算 方 法

数値計算は大きく分けて2種類行った。1つは特異点法をもちいた非粘性流れの計算、もう1つはその結果を元にした境界層の計算である。

4-1 特異点法による非粘性流れの計算 Biot-Savart の法則に基づき軸対称な渦輪による誘起速度を導き、それを並べることにより軸対称物体に適応させて行った。計算結果は圧力分布測定結果グラフ内の inviscid の曲線で示され、実験結果との比較検討に使用した。

4-2 境界層の計算について 境界層内の速度分布を知ることは摩擦抵抗を求める上で非常に重要である。今回は非粘性速度分布計算結果を元に層流は Karman-Pohlhausen の方法⁽⁶⁾、乱流は Head の方法⁽⁶⁾を用いて境界層厚さ及び運動量厚さの計算を行い、最終的には摩擦抵抗の計算を行った。

5. 実 験 結 果

まず、予備実験によりジェット流量及び吸い込み流量を測定した。

次に、先程得られた吸い込み流量から、一様流速と吸い込みの関連を考慮に入れ、吸い込み流速比 r_s と吸い込み流量係数 CQ という2つの吸い込みパラメータを導入した。

吸い込み流速比は、スロットにおける吸い込み流速と非粘性流れ計算から得られたスロット位置での流速(今回の形状では一様流速と一致)の比である。このパラメータは一つの形状のみに注目して解析を行う際には便利で、前報⁽⁴⁾ではこの流速比で整理してある。

吸い込み流量係数 CQ は、吸い込み面積がカスプの有無によって異なるために流量だけに注目したもので

$$CQ = \frac{Q}{U_0 V^{2/3}} \dots\dots\dots (1)$$

で表される。ここで Q は吸い込み流量、 U_0 は一様流速、 V は船体体積である。このパラメータは一様流速の上に飛行船の体積も考慮している。容積効率が重要視され船体内の空間を利用する飛行船では意味のあるパラメータであると考えられる。

また、レイノルズ数として、基準長さとして体積の3乗根を用いた体積レイノルズ数 R_v を採用しており

$$R_v = \frac{U_0 V^{1/3}}{\nu} \dots\dots\dots (2)$$

で表される。 ν は動粘性係数である。

ここから、本実験の結果を示す。

5-1 4つの領域とカスプの影響 圧力分布測定結果は、前報⁽⁴⁾の結果と同様に、その特徴から円柱周りの流れに類似した4つの領域⁽⁷⁾(亜臨界領域、臨界領域、超臨界領域、極超臨界領域)に分けることができた。それぞれの領域においてカスプ有りのスロット幅7mmとカスプ無しのスロット幅4mmでの圧力分布測定結果を示す(図3~6)。カスプ有りと無しでスロット幅は異なっているが、吸い込み入口の幅は等しい。ここではカスプの有無による圧力分布への影響についても検討する。吸い込みパラメータは吸い込み流量係数 CQ を用いている。これは船体体積が変化しても流量への変換が可能で、吸い込み流速比ではスロット形状の影響を大きく受けるためカスプの有無による比較が困難なので、吸い込み流量係数を採用した。inviscid の曲線は特異点法による非粘性圧力分布計算結果である。

亜臨界領域に属する $R_v = 3.44 \times 10^5$ の圧力分布を図3に示す。この領域での大きな特徴は吸い込みを行わない時に船体前方(船体の最大径付近)から流れはく離することである。これはカスプの有無に関係なく $R_v = 4 \times 10^5$ まで見られる現象である。吸い込むことによって若干圧力分布が変化しているがカスプ無しでは $CQ = 0.015$ まではあまり大きな変化は見られない。カスプ有りでは $CQ = 0.017$ より流れが急激に変化している。この体積レイノルズ数ではカスプの有無に関わらず吸い込み流量係数 0.017 が付着流れを実現する最低流量係数と考えられる。最大径以降で圧力係数が大きく低下して非粘性速度分布に近づいており、吸い込みが強い方が圧力係数最小値が小さくなる。この事は最大径以降で流れがさらに加速していることを示し、はく離点を遅らせる意味では非常に効果的である。吸い込み位置前方の $x/L = 0.7$ 付近から圧力係数が一定になっていて、これは大きなはく離泡の存在を示している。その後、スロット前後で大きく圧力回復し流れが再付着しているのが分かる。カスプの有無に注目するとスロット位置直前の圧力係数がカスプ無しの方が低いことが分かる。カスプ有りの方は圧力回復が起こっているときにスロット直前の圧力係数は非粘性値と一致しているが、カスプ無しの方は吸い込みを強くするにつれてスロット直前の圧力係数が下がっている。圧力分布が大きく変化してもスロット直前の圧力係数だけに注目すると吸い込みの増加につれて圧力係数は低下する。しかし、カスプ有りでは圧力分布の大きな変化と共に

Fig.3 Surface pressure distribution
(Subcritical region, $R_v=3.44 \times 10^5$)

スロット直前の圧力分布は上昇して非粘性値に近づいている。ここで注目すべきは、吸い込みを増やしているにもかかわらず、スロット直前の圧力係数が上がっている（流速が遅くなっている）という事実である。

臨界領域に属する $R_v=7.25 \times 10^5$ の圧力分布を図4に示す。この領域では亜臨界領域で見られた前方からは離れが全く見られない。吸い込み無しの状態でも全体的には流れは付着しており、吸い込むことによってスロット後部で完全付着流れが実現される。船体前方からの流れはほとんど変化がなく、 $x/L=0.72$ ではなく離れが確認できる。これはこの後方の流れが乱流であることを示している。ここで注目する点はスロット直前の圧力係数である。ここでの流れはカスプの有無によって全く異なった傾向を示す。カスプ有りのときは吸い込みを行なわないと圧力係数は0に近く、非粘性速度分布より圧力係数が高くなってはく離に近づいているがカスプ無しときはほとんど非粘性速度分布に一致している。これは吸い込み無しときはカスプ有り7mmより、カスプ無し4mmの方がはく離しにくいことを示している。しか

Fig.4 Surface pressure distribution
(Critical region, $R_v=7.25 \times 10^5$)

し、吸い込むことによってカスプ有りは非粘性速度に近づくように増速しているが、カスプ無しは非粘性速度から離れるように増速しているのが分かる。

超臨界領域に属する $R_v=2.06 \times 10^6$ の圧力分布を図5に示す。船体前方の圧力分布は同じであるが、臨界領域で確認できたはく離泡が消滅しているのが分かる。つまり、この地点ではすでに乱流に遷移している。ここでも圧力分布の傾向がカスプの有無で大きく異なる。カスプ有りの方は流れがはく離している。これは臨界領域で考察したスロット直前の流速が遅くなっていたことが原因と考えられる。他にも吸い込み位置での形状の影響も現れていると考えられる。カスプ有りのときは吸い込むことによりはく離が抑えられ、さらに完全付着流れが実現されている。カスプ無しときも同様にはく離泡が消えスロット後部で流れは付着しているが、スロット直前で流速は速くなっている。吸い込んだときのスロット直前の圧力係数のカスプの有無による違いは臨界領域と同様の傾向が確認できる。

極超臨界領域に属する $R_v=7.09 \times 10^6$ の圧力分布を図6に示す。この領域では船体前方の圧力係数が非粘

Fig. 5 Surface pressure distribution
(Supercritical region, $R_v=2.06 \times 10^6$)

性値と若干ずれている。このことから遷移位置が前方に移動して乱流領域が拡大していると考えられる。船体後方ではカスプ有りの $CQ=0.023$ を除き、カスプの有無に関係なく流れがはく離して吸い込みの増加に伴い非粘性速度分布に近づいているが、完全付着流れは実現されていない。この領域では完全付着流れの実現にはかなり大きな吸い込み流量係数が必要であることが分かる。カスプ無しの場合には、モーターの性能上これ以上吸い込みを増やすことができなかった。スロット後部の流れはカスプの有無によらずほとんど同じである。しかし、スロット直前の圧力係数に注目するとカスプ有りでは非粘性速度分布以上には加速していないが、カスプ無しでは非粘性速度分布を超えて加速している。これまでの全ての圧力分布から、カスプはスロット直前の流れを非粘性速度分布以上に加速させない働きがあることが確認できる。このことは後に述べる形状抵抗へ大きく影響する。

5-2 レイノルズ数に対する形状抵抗係数 先述の圧力分布より算出した抵抗係数をレイノルズ数の変化に対して評価する。今回用いた抵抗係数は、最

Fig. 6 Surface pressure distribution
(Hypercritical region, $R_v=7.09 \times 10^6$)

後部の圧力測定点(st.26)以降の圧力係数を st.26 の値と等しいものとして計算した(完全付着流れの場合には前報⁽⁴⁾の C_{Dm} に対応)。図7はカスプ有リスロット幅7mm、図8はカスプ無リスロット幅4mm、図9はカスプ無リスロット幅7mmの時の形状抵抗係数の変化である。吸い込みパラメータには吸い込み流量を用いている。これはレイノルズ数ごとに一樣流速が異なるので、比較に不適当なためである。横軸に体積レイノルズ数を対数目盛りで、縦軸に形状抵抗係数を示す。グラフ上部に先述の4つのレイノルズ数領域が示してあり、形状抵抗係数の変化もその領域と関連性がある。この全体の傾向は滑面円柱の形状抵抗係数の変化と類似するものである。各領域の境界は実験条件やヒステリシスの影響を受けるため正確ではなく、あくまでも目安であり、全形状に共通して用いている。

亜臨界領域では吸い込み流量が小さいときには船体前方から流れがはく離するために形状抵抗係数が大きくなっている。臨界領域では流れが後部まで付着しているので吸い込み無しの形状抵抗係数が大幅に減少する。吸い込み無しの状況に注目すると、そ

Fig. 7 Form drag coefficient (with cusp)

Fig. 9 Form drag coefficient (without cusp)

Fig. 8 Form drag coefficient (without cusp)

の後臨界領域では一定値を保つがレイノルズ数が高くなると形状抵抗係数が大きくなっている。これは船体後部で流れのはく離が始まるため、この領域での変化はスロット付近の形状の影響を大きく受ける。カusp有り形状では $R_v=1.17 \times 10^6$ で急激な変化が起こっているが、カusp無し形状では穏やかな上昇しか見られない。超臨界領域では船体後部で流れが完全にはく離し、形状抵抗係数が一定値に向かって上昇する。極超臨界領域ではレイノルズ数が変化しても流れはほとんど変わらないため、形状抵抗係数はほぼ一定値をとる。吸い込み無しの時の形状抵抗係数の値をカuspの有無で比較すると大きな差はないが、流れが後部まで付着することがある領域(臨界、超臨界領域)では若干の違いが見られる。それはスロット付近の形状が流れに影響を与えるためである。吸い込んだ時の変化に注目すると、抵抗の減少はカusp有りの方が大きく、特にその差が臨界、超臨界領域で現れる。このカusp無しの方が形状抵抗係数が大きいことについては、先述の表面圧力分布にお

いて、カusp無しの方がスロット直前の流れの加速に伴う圧力の下がり方がカusp有りに比べて大きいことが影響している。また、カusp無しのスロット幅4mmと7mmを比較すると、4mmの方が形状抵抗係数が大きいことが分かる。これはカusp無しときにスロット幅が狭いほどスロット直前で流速が速くなっており、それがスロット後部で流れが付着しているにもかかわらず、形状抵抗が減少しない大きな理由となっている。このことから、吸い込み位置にあるカuspは、流れの増速を防ぐ効果があり、形状抵抗の増加を抑える重要な要素であることが分かった。

5-3 推力を考慮に入れた全抵抗係数 最後に総合的な解析として、実験結果からの形状抵抗と計算結果からの摩擦抵抗を合計して全抵抗を算出し、さらに予備実験で測定したジェット流速を用いて推力を計算する。この全抵抗と推力が等しくなる状態をゼロ抵抗と呼ぶ。この状態をを実現するのに必要な吸い込み流量係数を検討する。ゼロ抵抗は成層圏での静止(定点停留)可能性を意味しており、より小さい吸い込み流量でゼロ抵抗が達成できることは出力最適化の上で非常に重要である。

全抵抗係数 C_{total} は形状抵抗係数 C_D と摩擦抵抗係数 C_f の合計で

$$C_{total} = C_D + C_f \quad (3)$$

で表される。これらの値はいずれも船体体積の $2/3$ 乗を用いて無次元化している。また、摩擦抵抗は吸い込みによっては変化しないと仮定している。この仮定は厳密には正しくないが、ゼロ抵抗が可能か否かの判断には実用上問題ないと考えられる。

Fig. 10 Drag coefficient
(with cusp, slot width=7mm)

Fig. 12 Drag coefficient
(without cusp, slot width=7mm)

Fig. 11 Drag coefficient
(without cusp, slot width=4mm)

ジェットによる推力 T_j は

$$T_j = \rho Q u_j \quad \dots\dots\dots (4)$$

で示される。ここで Q はジェット流量、 u_j はジェット流速である。これを形状抵抗係数 C_D と同様に船体体積の $2/3$ 乗を用いて無次元化したものを C_j とすると、これは

$$C_j = \frac{\rho Q u_j}{\frac{1}{2} \rho U_0^2 V^{2/3}} \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表される。

ジェットによる推力を考慮した全抵抗係数は、 C_{total} から推力である C_j を引けばよい。図 10～12 に吸い込み流量係数に対するジェット推力を考慮に入れた

全抵抗係数を表したグラフを示す。

図 10 はカスプ有りスロット幅 7mm のグラフである。亜臨界領域では付着流れを実現するために必要な吸い込み流量係数が大きいため、推力領域 ($C_{total} - C_j < 0$) になるためには $C_Q = 0.0275$ 必要である。臨界領域に入るとゼロ抵抗を実現するために必要な最小の吸い込み流量係数が徐々に減少して、臨界領域と超臨界領域の境であるレイノルズ数 1.10×10^6 、 2.06×10^6 で最小になっている。その時の吸い込み流量係数は約 0.017 である。この値は形状抵抗係数が最小値で一定になるために必要な最小の吸い込み流量係数 (0.015)、完全付着流れを実現する最小の吸い込み流量係数 (0.016) と非常に近い値である。必要な吸い込み流量係数が若干大きくなっているのは摩擦係数も考慮に入れているためである。これらのことからカスプ有りモデルではゼロ抵抗、最小形状抵抗、完全付着流れの 3 つは非常に密接な関係があるといえる。臨界領域から超臨界領域での違いは吸い込みを行っていないときである。超臨界領域になると船体後部での完全はく離に近づいているために抵抗が大きくなり、極超臨界領域の傾向に近づく。極超臨界領域に入るとまた一定の傾向が見られる (図中点線)。この領域ではゼロ抵抗は実現されていない。必要な吸い込み流量係数が増加している上にモーターの能力の限界から十分な吸い込み流量が得られていないために達成できないと考えられる。

次にカスプ無しモデルのスロット幅 4mm、7mm での結果 (図 11, 12) について述べる。記号については図 10 と同様である。全体的には形状抵抗が大きいため、ゼロ抵抗の実現が臨界、超臨界領域の非常に

吸い込み流量係数が大きいところでしか達成されない。臨界レイノルズ数に向かってゼロ抵抗実現に必要な流量係数が小さくなっているのはカスプ有りの時と同様である。全体の傾向は形状抵抗のみの変化と似たものとなっている。ここで注目すべき点は、ゼロ抵抗が実現される最小の流量係数がどのスロット幅でも $CQ=0.023$ 付近になっていることである。この値はカスプ有りの時に比べて非常に大きくなっている。それに対し亜臨界領域でのゼロ抵抗実現は $CQ=0.028$ 付近である。これはカスプ有りのときの値と大きく変わっていない。カスプ無しの際において流れの様子は形状によって様々な特徴があるが、ゼロ抵抗実現のために必要な最小吸い込み流量係数はスロット幅によらず一致することが確認できる。以上のことから吸い込み位置での流れが付着しているときにはカスプの効果が大きく現れ、はく離しているときにはカスプの影響が小さくなることが分かる。

6. ま と め

境界層制御機能を持つ飛行船の表面圧力分布をカスプ有りモデルとカスプ無しモデルの2種類で測定し、ジェット流速測定などの予備実験を行い、数値計算では非粘性圧力分布をもとにして境界層について計算した。これらの結果を以下のようにまとめる。

(1) 表面圧力分布および形状抵抗の変化より、飛行船模型周りの流れは、カスプの有無にかかわらず、レイノルズ数によって以下の4つの領域に分けることができ、それぞれの領域における特徴が確認された。

- ① 亜臨界領域 ($R_e \sim 4 \times 10^5$)
- ② 臨界領域 ($R_e = 4 \times 10^5 \sim 2 \times 10^6$)
- ③ 超臨界領域 ($R_e = 2 \times 10^6 \sim 4 \times 10^6$)
- ④ 極超臨界領域 ($R_e = 4 \times 10^6 \sim$)

(2) 吸い込み境界層制御においてカスプは吸い込み直前の流れの加速を防ぐ働きがあり、形状抵抗の低減のために重要な役割を果たす。また、その効

果が顕著に見られるのはスロット付近まで付着流れになる臨界、超臨界領域である。

(3) 完全付着流れ、形状抵抗最小値の実現に必要な吸い込み流量係数はカスプの有無、スロット幅の違いによって異なり、その値は臨界レイノルズ数付近で最小となる。また1つの流れに注目すると、流れのはく離位置が付着流れに必要な吸い込み流量に大きく影響する。

(4) 形状抵抗、摩擦抵抗、ジェット推力を考慮し、ゼロ抵抗(全抵抗=推力)が達成できた。ゼロ抵抗を達成するのに必要な最小吸い込み流量係数は、カスプ有りモデルで $CQ=0.017$ 、カスプ無しモデルで $CQ=0.023$ となった。この値はスロット幅に影響されない。

最後に本研究の遂行にあたって低温風洞の保守点検や運転および模型の組立、改修などにご協力頂いた筑波大学技官の中島孝氏に感謝の意を表する。

文 献

- (1) 恩田昌彦, 地球に優しい成層圏プラットフォーム, 日本機械学会誌, 99-928 (1996), 207.
- (2) Goldschmied, F. R., Integrated Hull Design, Boundary Layer Control, and Propulsion of Submerged Bodies, *J. Hydronautics*, 1 (1967), 2-11.
- (3) Goldschmied, F. R., Jet-Propulsion of Subsonic Bodies with Jet Total-Head Equal to Free Stream's, *AIAA-83-1790* (1983).
- (4) 松内一雄・ほか 4 名, 機論, 63-607, B (1997), 925-931.
- (5) Ringleb, F. O., Separation Control by Trapped Vortices, *Boundary Layer and Flow Control*, 1 (1961), 265, Pergamon Press, Oxford.
- (6) 生井武文・井上雅弘, 粘性流体の力学, (1978), 第5章, 理工学社.
- (7) Achenbach, E., Distribution of Local Pressure and Skin Friction around a Circular Cylinder in Cross-Flow up to $R_e = 5 \times 10^6$, *J. Fluid Mech.*, 34 (1968), 625-639.