

主流に平行に置かれた円柱上の圧力分布

芳賀 聡*, 加藤 榮二**

(昭和61年9月8日受理)

Pressure Distribution on a Circular Cylinder in Parallel to Main Flow

Satoshi HAGA* and Eiji KATO**

Abstract — The purpose of this report has been to study experimentally the flow on a circular cylinder above a flat plate.

The cylinder was placed parallel to a free stream and the plate, and the distance to the plate was varied. The main flow velocity was 21 m/s, and the velocity distributions on the plate were measured by hot-wire anemometer and the pressure distributions on the cylinder were measured by static pressure holes with a manometer.

The influence of the plate is limited to the part of the cylinder near the plate.

With decreasing the distance between the cylinder and the plate, the varying of the pressure distributions of the cylinder occurred at the vortex area on the cylinder, and the distance decreased more it spreaded to the down stream area of the cylinder.

1. 緒 言

自動車の燃料消費量が近年問題とされ、車輛重量の軽減、空気抵抗の減少などの対策がなされている。普通乗用車の場合、空気力学的特性を考慮した形状にすることにより、空気抵抗を減少する方法も取られている。実際、空気抵抗の10%減少により、燃量消費量は約3%改善されると言われている⁽¹⁾。大型輸送機関であるトラック、バスなどの場合にも、形状変更などによる空気抵抗の減少も見られるが⁽²⁾、運搬効率を考慮すれば、スペース確保のために形状変更には限界がある。またこのような輸送機関まわりの流れを考える時、陸上を移動するものであるから、地面の影響も考慮すべき要因となる。

また輸送機関ばかりでなく、流体中に物体が置かれる

現象は実際によく見うけられる。そしてこのような一様流中に置かれた物体に関する研究は、円柱を流れに対して垂直に置いたもの⁽³⁾、あるいは角のある物体についての研究などがある^{(4),(5)}。しかし地面の影響も考慮した物体まわり流れの研究は少ない。そこで本研究では、地面を平板でモデル化し、輸送機関のモデルとして円柱をとり、これを主流と平行に置き、平板と円柱との間隔が、円柱の圧分布に及ぼす影響を実験的に調べた。モデルとして短形断面形でなく円柱を取り上げたのは実験上の都合のためである。本実験に続いて物体からの空気の吹き出し、および吸い込みを行った場合についての実験を予定しており、本実験はこの実験の一部として行ったものである。物体から吹き出し、吸い込みを行うとき、物体の周方向に様な流れ場を作ることは、短形断面形のような角のある物体では非常に困難であり、周方向に一

* 茨城大学大学院工学研究科機械工学専攻（日立市中成沢町）

Graduate Student, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

** 茨城大学工学部機械工学科（日立市中成沢町）

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University, Hitachi 316, Japan

様な流れ場を作り易い物体として円形断面を選んだものである。

2. 記号

- C_P : 圧力係数 $[(P - P_0) / (\rho U_0^2 / 2)]$
- C_{PD} : 圧力抗力係数 $[D P / (\rho U_0^2 S / 2)]$
- D : 円柱の直径
- D_P : 円柱に作用する圧力抗力
- h : 円柱と平板との距離
- L : 円柱の長さ
- P_0 : 代表点における静圧
- P : 測定点における静圧
- r : 円柱中心からの半径方向の距離
- Re : レイノルズ数 $(U_0 D / \nu)$
- Re_l : 平板前縁から下流方向の距離を代表寸法にとるレイノルズ数
- S : 円柱の投影面積 $(\pi D^2 / 4)$
- U_0 : 一様流の流速
- u : 測定点における流速
- u' : 速度変動
- x, y, z : 円柱前面中心を原点とし、 x 軸を主流方向にとる右手系座標
- y_P : 平板からの y 方向への距離
- δ^* : 平板上の境界層厚さ
- ρ : 流体の密度
- ν : 流体の動粘性係数
- θ : 円柱の回転角

3. 装置および実験方法

3.1 装置

Fig.1に測定部とその座標系を示す。風洞は茨城大学工学部に設置されている多目的風洞装置(型式:水平吹出し式,吹出し口:800×800mm,送風機:直径1500mm,風速:4.8~47.7m/s,乱れ:全風速にわたって1.0%以下)を用いた。幅830mm,長さ1600mm,厚さ4.3mmの平板を吹出し口下端部より高さ20mmの位置に,吹出し口と接して設置する。平板の先端部は平板上の境界層厚さを薄くするため30°の角度にしてある。モデル②は直径35mmのアクリル樹脂製の支持棒③に取り付けられており,風洞の吹出し口から600mmの位置から主流と平行に設置された。モデルと平板との距離 h はフレーム⑥に固定される支持棒③の高さを変化させることにより Y 方向に400mmの可動範囲がある。

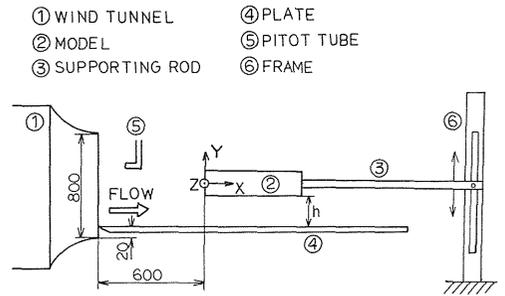


Fig. 1 Experimental apparatus (dimensions in mm).

Fig.2にモデルの詳細を示す。モデルはアクリル樹脂製の円柱であり,投影面積が風洞吹出し口面積の2.5%以下となるよう直径 D を140mmとし,円柱長さ L は480mmである。円柱の上流側円板面を前面, X 方向の曲面を側面,下流側円板面を後面と呼ぶ。これらの3面には,面に垂直に直径0.7mmの圧力測定孔を,前面に4個,側面に9個,後面に3個の合計16個設けてある。

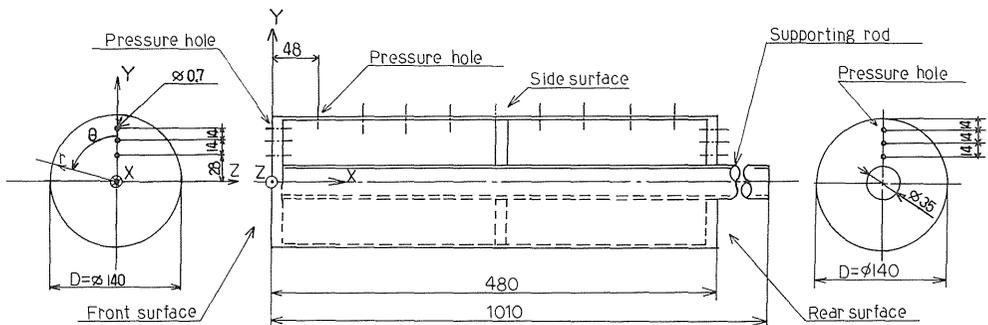


Fig. 2 Model (dimensions in mm).

3.2 実験方法

まず, 主流速度 U_0 を座標系の原点より上流 500mm に設置した直径 12.5mm の標準ピトー管と傾斜マノメータ (精度: 0.05 mm H₂O) で測定する。実験のレイノルズ数 Re は, 実際の車速状態を考慮し, $Re = 2.2 \times 10^5$ ($U_0 = 21$ m/s) として実験を行った。 Re が実際とは桁違いではあるが, 本実験よりも以前に同風洞を用いて行われた実験⁽⁶⁾において, $Re = 2.02 \times 10^5 \sim 3.04 \times 10^5$ では抗力係数が一定になることが報告されており, 本実験もこの実験の一部として行ったものであり, 実験条件を考慮して Re を決定したものである。またこの Re を時速にしてみると 75.6 km/h であり, 実際の車速状態に相当なものであると考えられる。

平板上の速度分布 u/U_0 , および乱れ強さ分布 $\sqrt{w'^2}/U_0$ は, 円柱を取り去った状態で, 移動装置 (精度: 0.1 mm) に設置された熱線プローブ (熱線の直径: 5×10^{-3} mm, 長さ: 0.7 mm) の出力を, 熱線流速計 (周波数範囲: 0.1~200kHz, 精度表示: 各レンジの $\pm 1\%$ digit) へ導いて決定する。

円柱表面上の圧力 P は, 円柱中心線を軸にして円柱を回転させ, 測定孔が Y 軸を基準にした反時計回りの任意の角度 θ となるようにして測定した。 θ は $10^\circ \sim 30^\circ$ の範囲で変化させてある。測定孔より導かれた圧力は傾斜マノメータによって測定した。圧力係数 C_p はピトー管の静圧 P_0 を基準にして $C_p = (P - P_0) / (\rho U_0^2 / 2)$ より求めた。

本実験のような三次元物体まわりの流れ測定では, 物体を支えるための支柱の存在は不可避であり, 従って支柱の影響は存在する。後面における圧力分布, 流線にも支柱の影響はあるが, 本実験では物体を支えるのに必要な大きさであり, かつ後面における影響をなるべく少なくするために (支柱の断面積 / 円柱後面積) = 1/16 とし, これより後面の流れに対する支柱の影響はほとんどないものとしている。

4. 実験結果および検討

4.1 平板上の流れ

測定部原点における平板上の境界層のレイノルズ数 Re_l は, 前縁からの距離を代表寸法にとれば, $Re_l = 8.1 \times 10^5$ であり, この境界層は一般には遷移領域かあるいは乱流である。 Fig. 3 において u/U_0 が乱流速度分布の

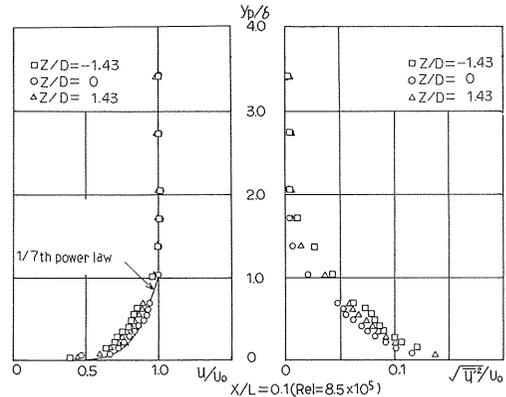


Fig. 3 Velocity distribution and intensity of turbulence on the plate.

1/7 乗則にはほぼ一致しており, このことから平板上の境界層は乱流になっていると考えられる。平板上の境界層厚さを δ^* とすれば, 円柱の直径に対する境界層厚さ δ^*/D は, 円柱最前部 $X/L = 0$ において $\delta^*/D = 0.11$, 円柱最後部 $X/L = 1$ において, $\delta^*/D = 0.18$ となった。

4.2 円柱表面上の圧力分布

Fig. 4, 5 は角度 θ を変えた場合の $h/D = 1.5, 0.1$ での圧力分布である。 $h/D = 1.5$ では θ が変化しても, 前面, 側面, 後面上の各測定点における圧力係数 C_p に変化はなく, 平板による影響はみられない。側面上の圧力は, $X/L = 0.2$ に C_p の極小値をもち, $X/L = 0.2$ から 0.6 までは急激に増加し, $C_p = 0$ の一定値に近づく。 $X/L = 0.6$ から $X/L = 1$ までは C_p はゆるやかな減少を示す。これは主流に対して円柱前面が垂直になっているため, 前面縁で流れのはく離が生じ, はく離の後方では円柱側面に接した流れが逆流して渦流域を形成していることを示している。そこで円柱側面において渦流域の

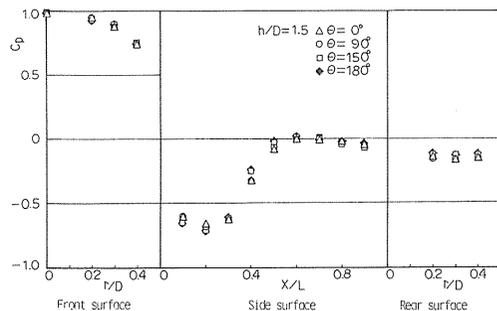


Fig. 4 Pressure distribution on the cylinder.

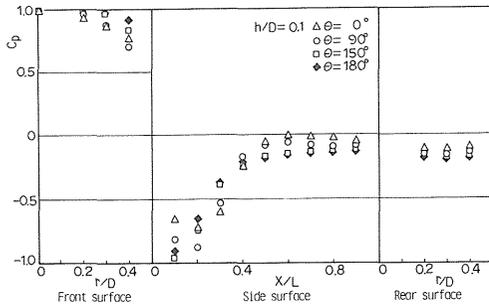


Fig. 5 Pressure distribution on the cylinder.

ある $X/L < 0.6$ の部分を円柱前部、渦流域より下流域 $X/L > 0.6$ を円柱後部と呼ぶことにする。

$h/D = 0.1$ では θ による C_p の変化が表われ、前面では θ の増大とともに C_p は増加し、 $C_p = 1$ に近づいている。これは円柱前面に当たる流体が平板の影響を受け、円柱後部へ流れにくくなっているためである。側面の円柱後部では θ の増加とともに各測定点における C_p は減少しているが、円柱前部にはこのような傾向はない。円柱前部では θ の増加とともに $X/L = 0.2$ における C_p の極小値が消滅し、 $X/L = 0.1$ での C_p が最小値になっている。これは前面ではなく離れた流れが平板の影響を受け、円柱側面に近づくため、円柱側面に沿った渦流域の強さが変化しているためと考えられる。

Fig. 6 ~ 9 に h/D についての円柱表面上の圧力分布を示す。 $\theta = 0^\circ$ では h/D によらず各面での C_p はほぼ一定値を示し、平板による影響はほとんどない。

前面では、 θ が増加するにつれ C_p は $C_p = 1$ へと増加する。この傾向は h/D が小さいほど著しくなっており、前面でせき止められた流れが、円柱と平板との距離が減少するにつれ円柱後部へと流れにくくなっていることを示している。

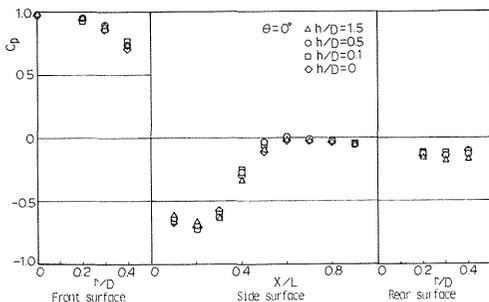


Fig. 6 Pressure distribution on the cylinder.

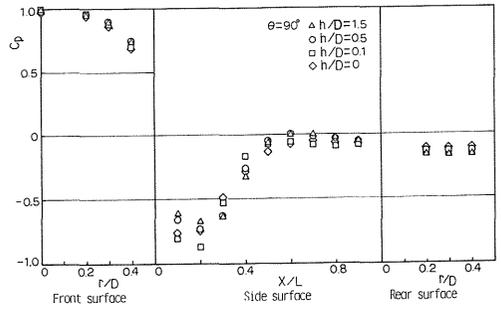


Fig. 7 Pressure distribution on the cylinder.

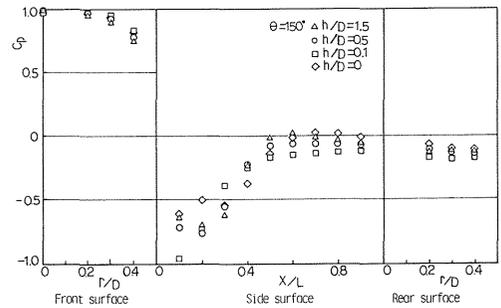


Fig. 8 Pressure distribution on the cylinder.

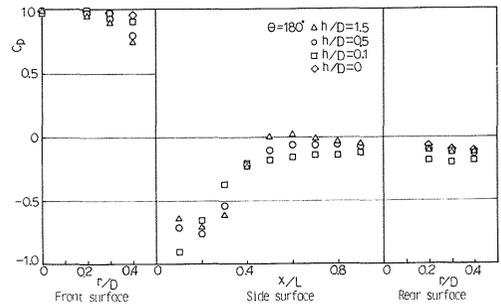


Fig. 9 Pressure distribution on the cylinder.

側面における C_p を h/D について比較してみると、 $h/D = 0.5$ では θ の増加にもない、同じ θ の $h/D = 1.5$ の C_p より低い値を示している。これは側面での渦流域が拡大するためと考えられるが、しかし X/L の個々の値については著しい変化は見られず、 $X/L = 0.8, 0.9$ での C_p が $h/D = 1.5$ の C_p にほぼ一致していることなどから、円柱側面全体にまで渦流域が拡大しているとは思われない。

$h/D = 0.1$ では θ の増加にもなると、 $X/L = 0.1$ の C_p は減少、 $X/L = 0.2, 0.3$ の C_p は増加し、円柱前部の $X/L = 0.2$ における C_p 値の極小値は消滅した。また

円柱後部の C_p も $h/D=1.5, 0.5$ に比較して低くなり, 平板による渦流域の拡大が円柱後部にまで及んでいることがわかる。

$h/D=0$ では $X/L=0.1, 0.2, 0.3$ での C_p が θ の増加につれて増加しており, 平板が円柱前部の渦流域に影響を与えていることがわかる。また $h/D=1.5, 0.5, 0.1$ に比較すると $X/L=0.6$ 以後の C_p も増加しており, $h/D=0.5, 0.1$ の傾向とは逆の傾向にある。

Fig.10～13 には X/L による円柱上の C_p を示す。

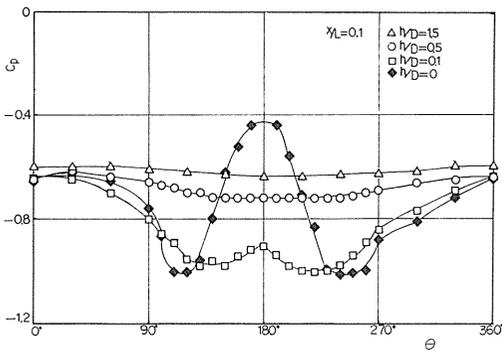


Fig. 10 Pressure distribution on the cylinder.

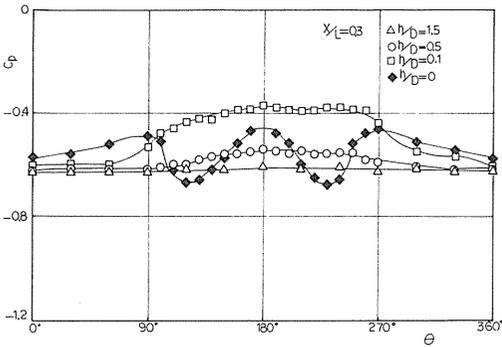


Fig. 11 Pressure distribution on the cylinder.

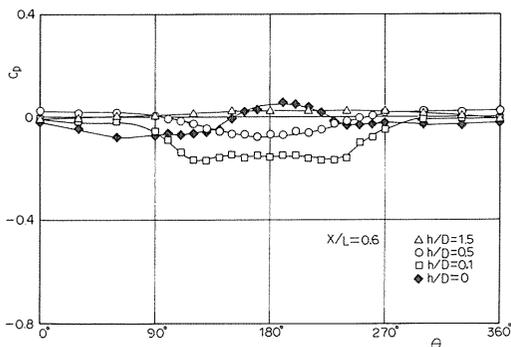


Fig. 12 Pressure distribution on the cylinder.

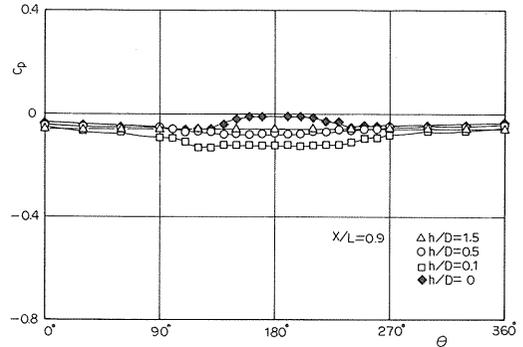


Fig. 13 Pressure distribution on the cylinder.

$h/D=1.5$ ではどの X/L においても, θ の変化による C_p の増減は見られずほぼ一定であり, 平板による影響はない。 $h/D=0.5$ になると $\theta=180^\circ$ を対称軸とし $\theta=0^\circ$ までの C_p のゆるやかな変化が, 個々の X/L について認められるが, 平板から遠い, $\theta=0^\circ$ 近傍の円柱上部では, $h/D=1.5$ の値にほぼ一致している。 $h/D=0.1$ になると $X/L=0.1$ において, 平板に近い, $\theta=180^\circ$ 近傍の円柱下部では, $\theta=180^\circ$ に C_p の極大値, $\theta=140^\circ, 220^\circ$ で C_p の極小値を示す $\theta=180^\circ$ を対称とした C_p の変化が表われている。しかし $X/L=0.3$ になると X/L での C_p の極小値はなく, 全体的にゆるやかな変化になっており, 円柱上部では $h/D=1.5$ の C_p とほぼ一致している。 $h/D=0$ では $h/D=0.1$ の極小値が $\theta=110^\circ, 250^\circ$ にまで広がっているが, $X/L=0.3$ になると 180° より寄ってくる。また X/L の増加につれ, θ の変化による C_p の増減はゆるやかになり, 円柱上部では $h/D=1.5$ の C_p に一致している。

4.3 圧力抗力

円柱の圧力抗力係数は, 円柱前面にかかる圧力と円柱後面にかかる圧力の差より得た圧力抗力 D_p より, 圧力抗力係数 $C_{pD} = D_p / (\rho U_0^2 S / 2)$ として求めた。円柱後面での支柱部分での圧力は, 後面を各 θ に対する半径 r 上での3点の圧力を測定し, この測定された3点より支柱部分の圧力を外捜している。

圧力抗力 D_p の次元解析を行ってみると

$$D_p = f(\rho, \mu, U_0, S, h, \delta^*)$$

$$\frac{ML}{T^2} = k \rho^\alpha S^\beta U_0^\gamma \mu^\delta h^\epsilon \delta^{*\eta}$$

$$\frac{ML}{T^2} = k \left(\frac{M}{L^3}\right)^\alpha L^{2\beta} \left(\frac{L}{T}\right)^\gamma \left(\frac{M}{LT}\right)^\delta L^\epsilon L^\eta$$

$$\begin{cases} \alpha = 1 - \delta \\ \gamma = 2 - \delta \\ \beta = \frac{1}{2}(2 - \delta) - \frac{1}{2}(\epsilon + \eta) \end{cases}$$

$$D_P = k \rho^{1-\delta} S^{\frac{1}{2}(2-\delta) - \frac{1}{2}(\epsilon+\eta)} U_0^{2-\delta} \mu^\delta h^\epsilon \delta^{*\eta}$$

$$= k (\rho U_0^2 S) \left(\frac{\mu}{\rho S^{1/2} U_0}\right)^\delta \left(\frac{h}{S^{1/2}}\right)^\epsilon \left(\frac{\delta}{S^{1/2}}\right)^\eta$$

$$\frac{D_P}{\frac{\rho}{2} U_0^2 S} = f \left(R_e, \frac{h}{D}, \frac{\delta^*}{D} \right)$$

よって次元解析によれば

$$C_{PD} = f \left(R_e, \frac{h}{D}, \frac{\delta^*}{D} \right)$$

となる。

ここで本実験では R_e を一定としているので、 δ^*/D も一定となり C_{PD} は h/D の関数となるため、これより抗力係数を h の関数としてグラフ化した。Fig. 14 にその結

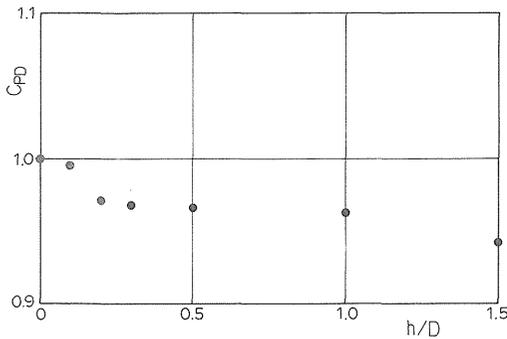


Fig. 14 Drag coefficient of the cylinder.

果を示す。 C_P によって認められた平板の影響のない $h/D=1.5$ に比べて h/D が減少するとともに、 C_{PD} は増加していると言える。これはFig. 6~9において h/D が減少するとともに、前面における C_P が増加していることから確認できる。

5. 結 言

実験の範囲で以下の事が判明した。

- 1) 平板による円柱表面上の圧力変化は、平板に近い円柱下部に起こり、平板から離れている円柱の上部では圧力変化は認められなかった。
- 2) 円柱と平板との距離が大きき時は、平板の影響は、平板に近い円柱下部の円柱側面に接した渦流域に限られ、円柱と平板との距離が小さくなると、渦流域だけでなく円柱下部全体に平板の影響が認められる。
- 3) 円柱の圧力抗力は、円柱と平板の距離が増加するとともに減少している。

終りに、本実験に協力された当時の卒研生の諸氏に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 三田村他：機械の研究，32-1，(1980)，136.
- 2) W. T. Mason and J.R.P.S. Beebe：General Motor Research Laboration Symposium，(1976).
- 3) P.W. Bearman and M.M. Zdravkovich：J. Fluid Mechanics，89，(1978)，33.
- 4) 永野他2名：日本機械学会論文集B編，47-413，(1981)，32.
- 5) 溝田，岡島：土木学会論文報告集，312，(1981)，39.
- 6) 伊藤：気流に平行に置かれた吹き出し，吸い込みを伴う円柱まわりの流れ，修士論文，(1983).