

自動車に追い越される自転車の 空力的影響に関するシミュレーション*

A simulation of aerodynamic effect to the bicycle
caused the by a passing vehicle

加藤 義和¹⁾
Yoshikazu KATO

岩佐 哲夫²⁾
Tetsuo IWASA

松田 充生³⁾
Mitsuo MATSUDA

宮井 義裕⁴⁾
Yoshihiro MIYAI

There are many reasons for wobble of the bicycle by a passing vehicle, for example, human engineering, riding technique, enviroment of road, aerodynamic effect and etc.

This paper describes a simulation of aerodynamic effect to the bicycle by a passing vehicle experimentally and theoretically.

Experiment is carried out using 1/6 scale model of vehicle and bicycle. Propulsion of the vehicle model is by catapult arrengment. Aerodynamic forces acting to the bicycle are measured with balance mounted under the bicycle, and flow pattern caused to a passing vehicle is examined by means of tufts.

To compare with experimental results, numerical calculation is carried out for passing motion of two cylinders.

1. ま え が き

近年、道路の交通環境は、停滞、騒音、振動、排ガス、事故などの深刻な問題を起しながら、推移している。都市近郊においては、一時期、減少傾向にあった自転車が、原動機付自転車とともに、地域社会の軽便な乗物として定着しつつある。この結果として、自動車と自転車の間の事故が、多発し、社会問題となって久しい。自転車の事故防止については、地方自治体、警察などにおいても、その対策を進めているようであるが、研究機関における事故防止に関する研究は非常に少ない。

大阪産業大学産業研究所自動車工学研究室においては、研究活動の1つとして、対歩行者（自転車も含む）の交通事故防止および安全指針に関する研究を続けてきた。本研究は、自動車による自転車の事故の防止に関する研究の一環として、自動車とすれちがうさいの自転車が、どのような空力的影響を受けるかを調べようとするものである。すでに、物体のすれちがい問題として、列車と列車については、鉄道技術研究所の川口によって⁽¹⁾、バスと自動車については、Ford Motor Co. の F.N. Beauvais によって⁽²⁾、自動車と歩行者については、著者によって⁽³⁾ ⁽⁴⁾、解明されている。

*昭和55年2月1日原稿受理

1), 2), 3), 4) 大阪産業大学工学部交通機械工学科

自動車とすれちがう際の自転車のふらつき現象には、医学的、人間工学的要因と自転車運転者の技倆、自転車の車種、積荷状態などの条件を加味しなければならないが、本報告では、これらの検討は今後の課題として、自転車におよぼす空力的影響に限って行なった。

実験は、模型を用いて、空気力測定と流れの可視化と、2物体のすれちがいの理論式を導入し、数値計算によるシミュレーションによる検討も行なった。

2. 模型による実験

2.1 実験方法と装置

(a) 空気力の測定

自転車の近傍を、自動車が速度 V で通過するとき、自転車の受ける力を F とする。力 F は、自動車の進行とともに変化する非定常な力である。Fig. 1は座標系を示す。座標の原点を、自転車の前輪と後輪の路面との接点を結ぶ距離の midpoint とする。 x 軸を、自転車の前輪と後輪の路面との接点を結ぶ線とし、自動車の進行方向と逆方向を正方向とする。 y 軸は原点を通り、 x 軸に直角方向とし、自動車に向う方向を正とする。 z 軸は、原点を通り、鉛直方向とし、上向を正とする。自動車の走行によって、自転車の受ける力 F の、 x 、 y 、 z 軸の正方向の力を、それぞれ F_x 、 F_y 、 F_z とする。 x 、 y 、 z 軸まわりのモーメントをそれぞれ、 M_x 、 M_y 、 M_z とし、Fig. 1の方向を正とする。

空気力 F_x 、 F_y 、 F_z の測定は、空力天秤を使って行なう。

モーメント M_x 、 M_y 、 M_z は次式によって求める。

$$M_x = F_y z - F_z y$$

$$M_y = F_z x - F_x z$$

$$M_z = F_x y - F_y x$$

ただし、 x 、 y 、 z は力 F の作用点の各軸からの距離である。

空力諸係数は、次のようにして求める。

$$C_x = F_x / \frac{1}{2} \rho V^2 S$$

$$C_y = F_y / \frac{1}{2} \rho V^2 S$$

$$C_z = F_z / \frac{1}{2} \rho V^2 S$$

$$C_{Mx} = M_x / \frac{1}{2} \rho V^2 SL$$

$$C_{My} = M_y / \frac{1}{2} \rho V^2 SL$$

$$C_{Mz} = M_z / \frac{1}{2} \rho V^2 SL$$

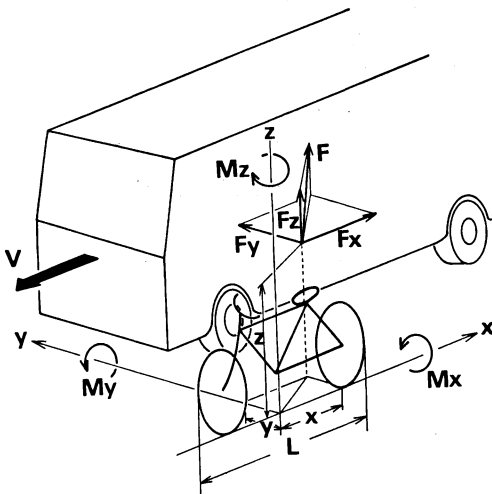


Fig.1 Aerodynamic axis system

ただし、 ρ は空気の密度、 S は、乗手も含めた自転車の投影側面積、 L は、自転車の全長である。

Fig.2は、実験装置である。発射装置によって、 $1/6$ 縮尺のバス模型を走行させる。そのとき、 $1/6$ 縮尺の自転車模型に作用する空気力を自転車下部にとりつけられた天秤のピック・アップより検出し、記録計に記録する。

Fig.3とFig.4は、実験に使用した、 $1/6$ 縮尺のバスと自転車の模型である。

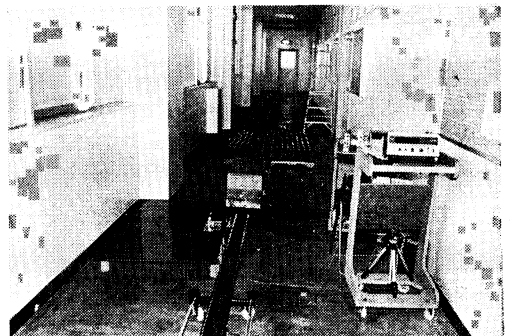


Fig.2 Laboratory test installation

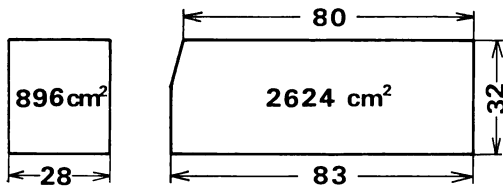


Fig. 3 1/6 scale bus model

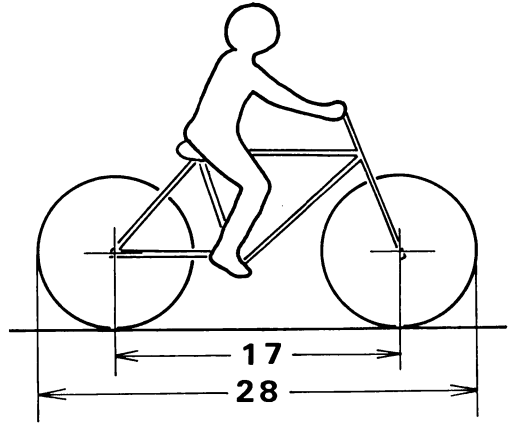


Fig. 4 1/6 scale bicycle model

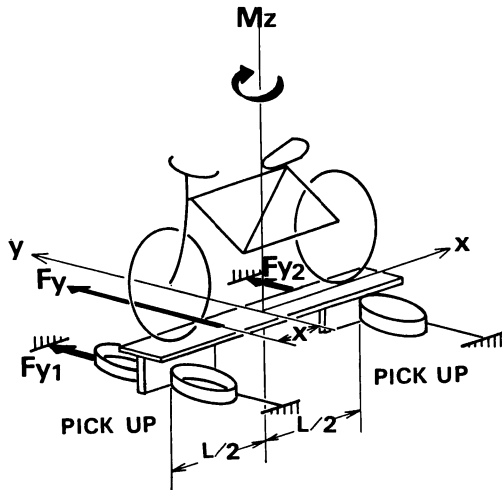


Fig. 5 Aerodynamic balance system

の装置を示す。地面に相当する板に、 $7\text{ cm} \times 7\text{ cm}$ の間隔で、高さ 17.6 cm のピアノ線を配置し、その先端に、 7 cm の白い毛糸をフリージョイントでとりつける。自動車によってひきおこされた流れによって、毛糸がたなびき、その様子を写真撮影とビデオ装置によって記録する。

2. 2 実験結果と解析

(a) 空気力

自動車速度は、 $20\text{ km/h} \sim 50\text{ km/h}$ 、レイノルズ数は $R_e = V\ell/\nu$ で、 $R_e = 3.3 \times 10^5 \sim 8.3 \times 10^5$ で行なった。ただし、 ℓ は自動車の全長、 ν は空気動粘性係数である。Fig. 7 は、自転車と自動車の配置図を示す。時間は、自動車前端が自転車の中心と一致したとき、時間軸の原点とする。

Fig. 8 は、速度 40 km/h 、間隔 12 cm のときの結果の1例を示す。図は、横軸は、 $Vt/\frac{L}{2}$ をとっており、 $Vt/\frac{L}{2} = -1$ は自動車の先端と自転車の後端がならんだときであり、 $Vt/\frac{L}{2} = 0$ は、自動車前端が、自

Fig. 5 は、本実験で使用した空力天秤の概要である。本実験では、 F_Y は2組のピック・アップより求めた F_{Y1} と F_{Y2} により、次のように算出した。

$$F_Y = F_{Y1} + F_{Y2}$$

(b) 流れの可視化

通過時の流れの可視化を行なうために、毛糸による方法で行なった。これは、タフト法とよばれる方法である。Fig. 6 は、タフト法による可視化

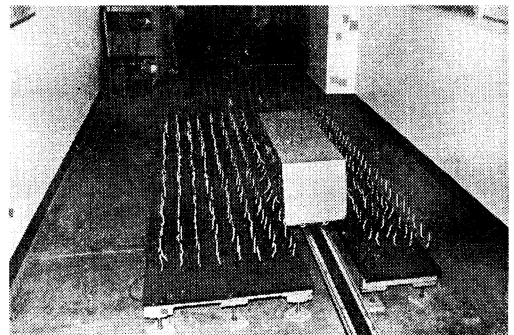


Fig. 6 Visualization of flow by means of tufts

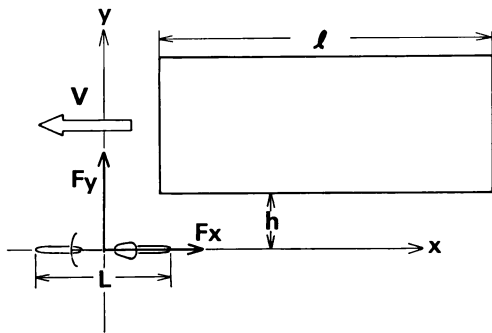


Fig. 7 Sample of experimental data

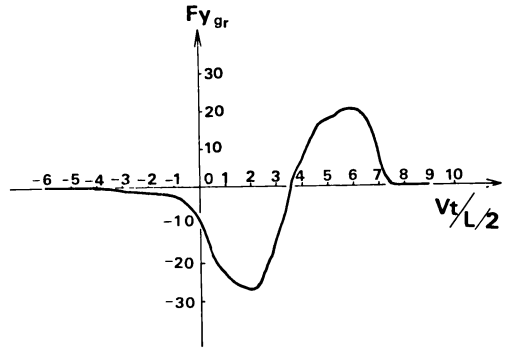


Fig. 8 Notation diagram of passing situation

転車の中心にあるときであり、 $Vt/L/2 = 1$ は、自動車の前端が、自転車の前端とならんだときである。縦軸は、 F_y をとってある。

本実験例によると、 $Vt/L/2 = 2$ で、自転車は外向きの押される力が最大になる。これは自動車の前端が、自転車の中心より1自転車長、通過したときである。つづいて、あらわれる自転車を吸いこまれるように働く最大の力は $Vt/L/2 = 6$ で起る。これは、自動車前端が、自転車の中心より、3自転車長くすすんだところである。他の実験結果もほぼ同じであった。

(b) 流れの可視化

Fig. 9 は可視化による結果の1例を示す。Fig. 10 は、その結果より、流れの模様を作図したものである。

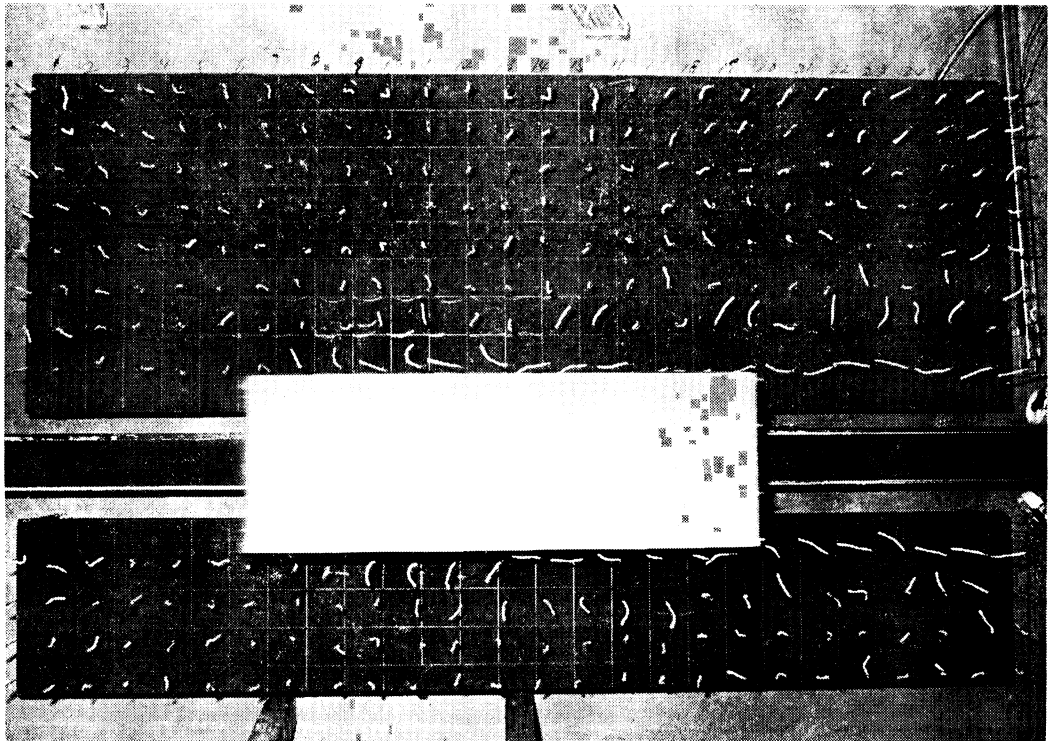


Fig. 9 Flow pattern caused to a passing vehicle for $V=39.6\text{Km/h}$ (photograph)

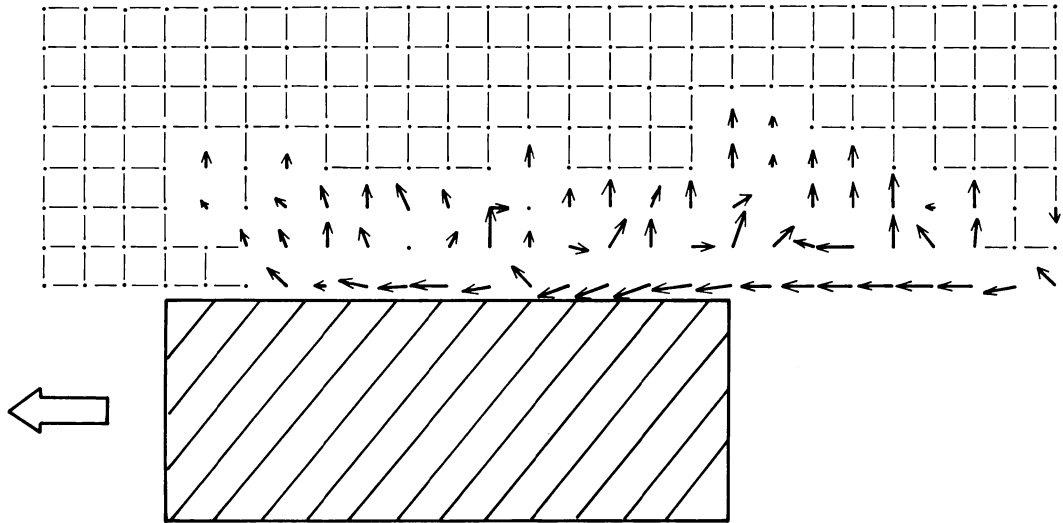


Fig. 10 Flow pattern caused to a passing vehicle for $V=39.6\text{Km/h}$

自動車前端より前方では、毛糸法で検出される程の流れの変化はない。しかし、自動車側面の30~50%付近までは、自動車が流体を押しわけるように移動する結果として周囲に押される。しかし、それより後方側通では粘性によって、流体がひきずられ、進行方向に流れる。その周囲外側では、周囲に押されるように流される。自動車通過後方では、自動車後方に出来たはく離域に吸いこまれるように流れる。

3. 数値計算による検討

3.1 2物体の「すれちがい」問題の空気力学的解明

著者らは、すでに、2つの円柱がすれちがうときの空力的挙動を、Carpenter⁽⁵⁾や川口⁽¹⁾の方法を応用して、特に、異なる直径の内柱について、理論式を導入した⁽³⁾。

自動車と自転車（歩行者も含む）のすれちがい時の空力的解明の第1段階として、理想流体中で、2つの異なる直径の円柱がすれちがう際の数値解析を試みた。

2つの円柱AとBの半径を、それぞれ a 、 b とする。円柱Bは静止し円柱Aは速度 V で移動しているとする。Fig. 11 は、すれちがい問題のときの座標系である。時間の原点は、円柱AとBがもっとも接近したときとする。そのとき2つの円柱の中心を結ぶ距離を $2k$ とし、その中点を、 x - y 軸の原点とする。そして、自動車の進行方向と平行に x 軸とし、 y 軸は原点を通り、 x 軸に直角とする。また、円柱Aと円柱Bの中心を結ぶ線と x 軸の正方向とする角を γ とする。

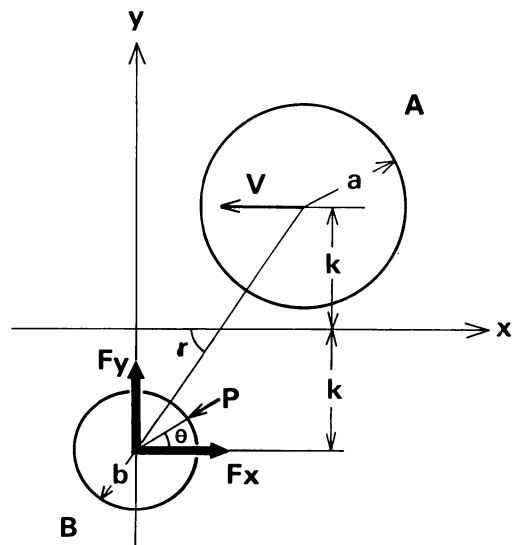


Fig. 11 Notation diagram for passing motion of two cylinders in an ideal fluid

任意の位置 (x, y) での速度ポテンシャル ϕ は、次のようになる。

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3 + \phi_4 + \phi_5 + \dots$$

ただし、

$$\phi_1 = \frac{Va^2(x - x_1)}{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2},$$

$$x_1 = -Vt, \quad y_1 = k, \quad \xi_1 = 0, \quad \eta_1 = -k.$$

以下同様に、

$$\phi_2 = -\frac{Va^2b^2}{(x_1 - \xi_1)^2 + (y_1 - \eta_1)^2} \times \frac{(x - \xi_2)\cos 2\gamma + (y - \eta_2)\sin 2\gamma}{(x - \xi_2)^2 + (y - \eta_2)^2},$$

$$x_2 = -Vt + Vt\delta'', \quad y_2 = k - 2k\delta'',$$

$$\xi_2 = -Vt\delta', \quad \eta_2 = -k + 2k\delta',$$

$$\delta' = b^2/(V^2t^2 + 4k^2), \quad \delta'' = a^2/(V^2t^2 + 4k^2),$$

$$\gamma = \tan^{-1}(-2k/Vt).$$

$$\phi_3 = \frac{Va^4b^2}{[(x_1 - \xi_1)^2 + (y_1 - \eta_1)^2][(x_1 - \xi_2)^2 + (y_1 - \eta_2)^2]} \times \frac{(x - x_3)}{(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2},$$

$$x_3 = -Vt + \frac{\delta''}{1 - \delta'}Vt, \quad y_3 = k - \frac{2k\delta''}{1 - \delta'},$$

$$\xi_3 = -\frac{\delta'}{1 - \delta'}Vt, \quad \eta_3 = -k + \frac{2k\delta'}{1 - \delta'}.$$

$$\phi_4 = -\frac{Va^4b^4}{[(x_1 - \xi_1)^2 + (y_1 - \eta_1)^2][(x_1 - \xi_2)^2 + (y_1 - \eta_2)^2]} \times [(\xi_1 - x_3)^2 + (\eta_1 - y_3)^2]$$

$$\times \frac{(x - \xi_4)\cos 2\gamma + (y - \eta_4)\sin 2\gamma}{(x - \xi_4)^2 + (y - \eta_4)^2},$$

$$x_4 = -Vt + \frac{(1 - \delta')\delta''}{1 - 2\delta'}Vt,$$

$$y_4 = k \left\{ 1 - \frac{2(1 - \delta')\delta''}{1 - 2\delta'} \right\},$$

$$\xi_4 = -\frac{(1 - \delta')\delta'}{1 - 2\delta'}Vt,$$

$$\eta_4 = k \left\{ -1 + 2\delta' \frac{(1 - \delta')}{1 - 2\delta'} \right\}.$$

$$\phi_5 = \frac{Va^6b^4}{[(x_1 - \xi_1)^2 + (y_1 - \eta_1)^2][(x_1 - \eta_2)^2 + (y_1 - \eta_2)^2]} \times [(\xi_1 - x_3)^2 + (\eta_1 - y_3)^2]$$

$$\times \frac{1}{(x_1 - \xi_4)^2 + (y_1 - \eta_4)^2} \times \frac{(x - \xi_5)}{(x - \xi_5)^2 + (y - \eta_5)^2}.$$

$$x_5 = -Vt + \frac{(1 - 2\delta')\delta''}{(1 - 3\delta' + \delta'^2)}Vt,$$

$$y_5 = k \left\{ 1 - 2 \frac{(1 - 2\delta')\delta''}{(1 - 3\delta' + \delta'^2)} \right\},$$

$$\xi_5 = -\frac{(1 - 2\delta')\delta'}{(1 - 3\delta' + \delta'^2)}Vt,$$

$$\eta_5 = k \left\{ -1 + 2 \frac{(1 - 2\delta')\delta'}{(1 - 3\delta' + \delta'^2)} \right\}.$$

x 軸と y 軸方向の速度 u, v は次のように与えられる。

$$u = u_1 + u_2 + u_3 + u_4 + u_5 + \dots,$$

$$v = v_1 + v_2 + v_3 + v_4 + v_5 + \dots.$$

ただし,

$$u_1 = \partial\phi_1/\partial x, \quad u_2 = \partial\phi_2/\partial x, \quad u_3 = \partial\phi_3/\partial x, \dots,$$

$$v_1 = \partial\phi_1/\partial y, \quad v_2 = \partial\phi_2/\partial y, \quad v_3 = \partial\phi_3/\partial y, \dots.$$

合速度 q は,

$$q^2 = u^2 + v^2$$

で求める。

圧力係数は、ベルヌーイの定理より、次式のようになる。

$$C_P = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2}\rho V^2} = -\frac{\partial\phi}{\partial t} / \frac{1}{2}V^2 - \frac{q^2}{V^2}.$$

ただし、 P 任意点の圧力、 P_0 : 無限遠方での圧力、 ρ : 空気密度、 V : 円柱Aの速度、そして、

$$\frac{\partial\phi}{\partial t} = \frac{\partial\phi_1}{\partial t} + \frac{\partial\phi_2}{\partial t} + \frac{\partial\phi_3}{\partial t} + \dots$$

である。

円柱Bに作用する x 軸と y 軸の方向の力、 F_x , F_y は、円柱Bの表面で、圧力係数を積分すれば得られる。

$$F_x = -\oint_B P b \cos\theta d\theta,$$

$$F_y = -\oint_B P b \sin\theta d\theta.$$

ここで、

$$F_x = C_x \rho V^2 S / 2,$$

$$F_y = C_y \rho V^2 S / 2$$

とすると、

$$C_x = -\frac{b}{S} \oint_B C_P \cos\theta d\theta,$$

$$C_y = -\frac{b}{S} \oint_B C_P \sin\theta d\theta.$$

ここで、 $S = 2 b \times 1$ とすると、

$$C_x = -\frac{1}{2} \oint_B C_P \cos\theta d\theta,$$

$$C_y = -\frac{1}{2} \oint_B C_P \sin\theta d\theta$$

となる。

数値計算にあたって、

$$\frac{k}{b} = m, \quad \frac{a}{b} = n, \quad \frac{Vt}{b} = S$$

として、方程式の無次元化を行なう。また、円柱Bの表面の座標は、次のようにあらわされる。

$$\frac{x}{b} = \cos\theta, \quad \frac{y}{b} = \sin\theta - m.$$

Fig.12 は無次元量で表わした座標系である。ただし、円柱Aと円柱Bの間隔 h (無次元量) は、次のようにあらわされる。

$$2m - n - 1 = h$$

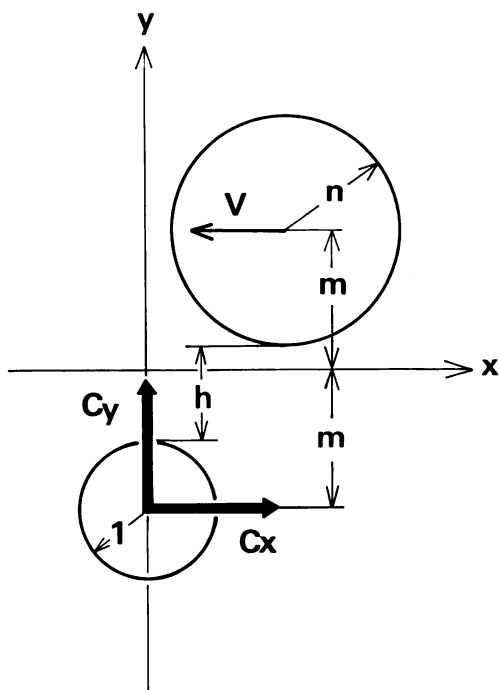


Fig.12 Notation diagram for passing motion of two cylinders (non-dimension)

3.2 数値計算例

数値計算は、大阪産業大学の電子計算機のHITAC M150 を用いて行なった。

2円柱の半径の比率 n として、 $n=1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ とした。無次元量で表わした x 軸からの距離 m として、 $m=2.75, 3.0, 3.5, 4.5, 5.0$ とする。ただし $h=0$ のときは、2個の円柱が接するときであり、そのときの n, m は除く。時間的変化として $S=-5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5$ について数値計算を行なった。

静止した円柱Bのまわりの圧力分布と、 x 軸と y 軸の各方向の空力係数 C_x, C_y が円柱Aの移動とともに、どのように変化するかをしらべた。

数値計算の結果をもとにして、 m ないし h と n をパラメータにして、 C_x, C_y の変化をしらべた。つまり、2つの円柱の半径比 n と間隔 m ないし h による C_x, C_y の変化をしらべた。

Fig.13 の圧力分布は、 $n=4.0, m=3.5$ ($h=2.0$) のときの時間的変化を表わす。円柱Aが円柱Bに接近につれて、 $0^\circ \sim 180^\circ$ の間の圧力降下は大きくなる。 $S=0$ のとき、すなわち、円柱がもっとも接近したとき、 $180^\circ \sim 360^\circ$ の圧力の降下は小さく、しかもほぼ一定である。しかし、 $0^\circ \sim 180^\circ$ の圧力降下は大きく、そのために、 y 軸方向の力 F_y は、もっとも大きい。これらは、他の例でも同じである。

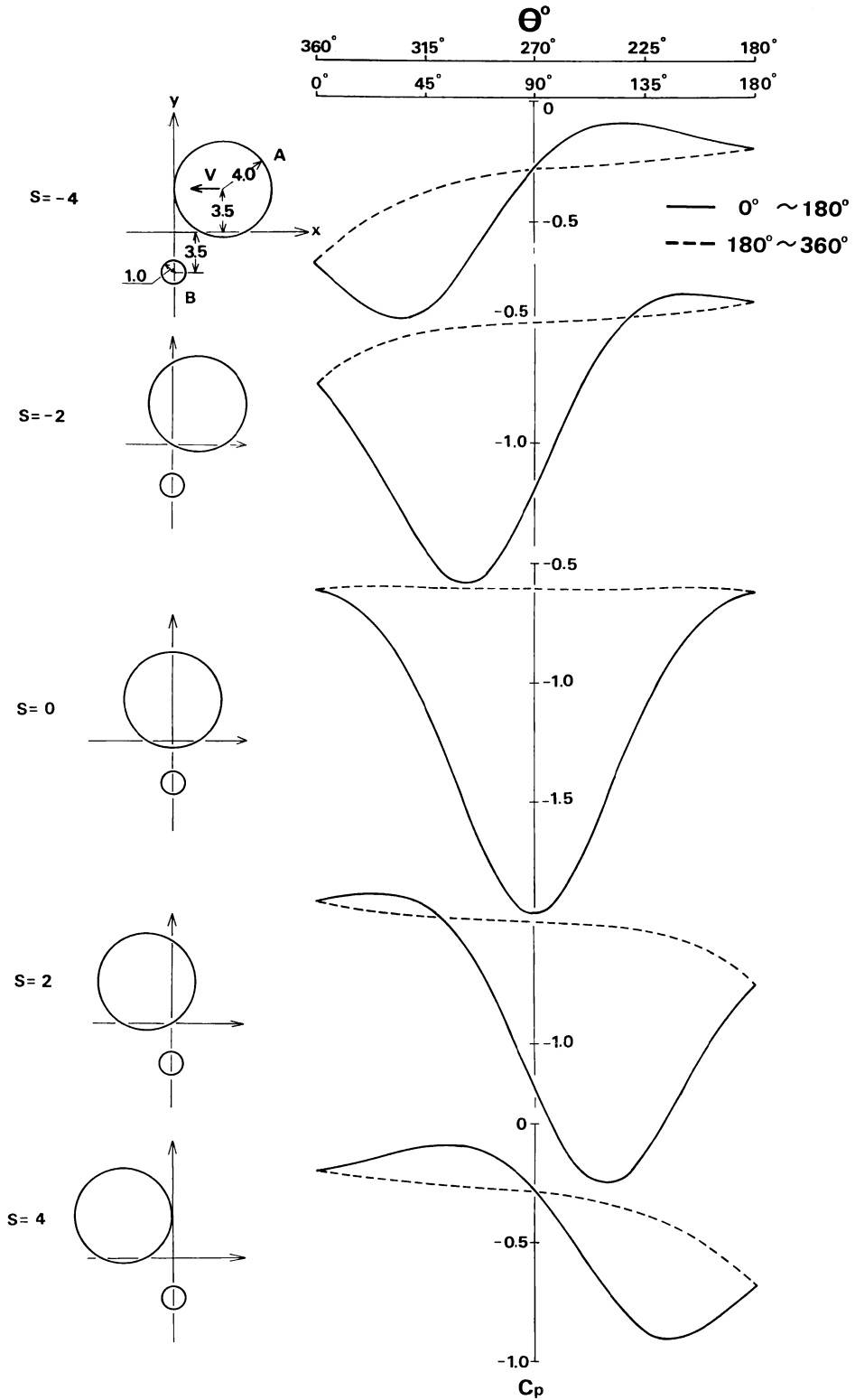


Fig. 13 Pressure distribution on cylinder B for $n=4.0$, $m=3.5$

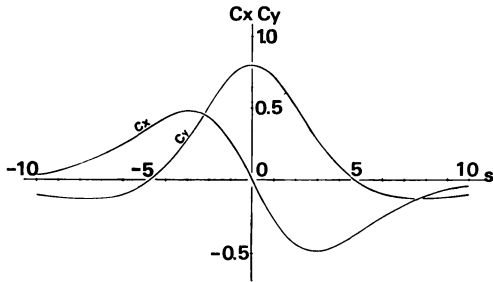


Fig. 14 Force coefficients variation for $n=4.0, m=3.5$

円柱AとBの中心がもっとも接近したとき、吸いこまれる力がもっとも大きく作用することを示す。

更に、円柱Aが進行して、円柱Bの近傍を通過後に、負の方向に第3ピークの値をもつ。

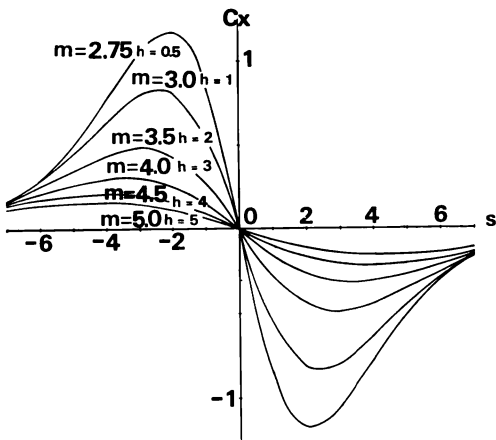


Fig. 15 C_x variation for $n=4.0$

Fig. 16 は、 $n=0.4$ のときの C_y の時間的変化を表わす。接近にともなって、負の方向、すなわち、円柱Bを外向きに押す方向に作用し、負の方向に第1のピーク値がある。更に接近すると、次第に、正の方向に作用し、もっとも接近したときに、第2のピーク値が正の方向、すなわち、自動車に吸いこまれる方向に作用する。第2のピーク値は、間隔 (h) が小さくなると大きくなる。速さがるにつれて、 C_y の値は減少し、第3のピーク値が、負の方向にある。

Fig. 17 は、色々な h をパラメータとして、 n の変化に対する C_y の第2ピーク値の変化を表わす。 n の変化に対して、 C_y の値は、増加するが、ある n のときに、最大値をとり、それ以上になると、緩慢に減少しはじめる。 C_y が最大値をとる n の値は、 h の値が小さいほど、小さい。

Fig. 18 は、色々な n をパラメータとして、 h の変化に対する C_y の第2ピーク値の変化を表わす。 h が小さいとき、 C_y の値は、急激に増加する。

Fig. 14 は、Fig. 13 の圧力分布のときの力の変化をあらわす。

C_x は、円柱Aと円柱Bの中心がもっとも接近する直前に、正の方向に第1のピーク値をとる。円柱Aが円柱Bを通過して、負の方向に第2のピーク値をとる。

C_y は、円柱AとBの中心がもっとも接近する直前に負の方向に第1ピーク値をとる。円柱Aが更に進んで、円柱Bの中心ともっとも接近したとき、正の方向に第2のピーク値をとる。すなわち、円

3. 3 解 析

Fig. 15 は、 $n=0.4$ のときの C_x の時間的変化を表わす。 C_x は、まず進行方向と逆方向に力が作用し、円柱Bに円柱Aがもっとも接近する前に、正方向に第1のピーク値がある。そして、移動につれて、減少し、円柱Aが円柱Bの通過後に、負の方向に、第2のピーク値がある。円柱Aと円柱Bの間隔が大きくなるにつれて (h が大きくなるにつれて)、ピーク値は、小さくなる。

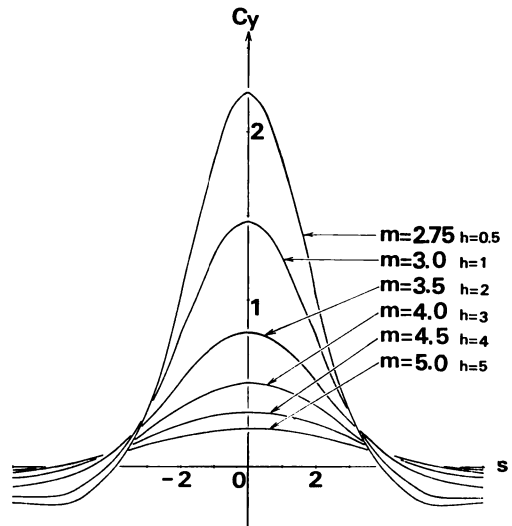


Fig. 16 C_y variation for $n=4.0$

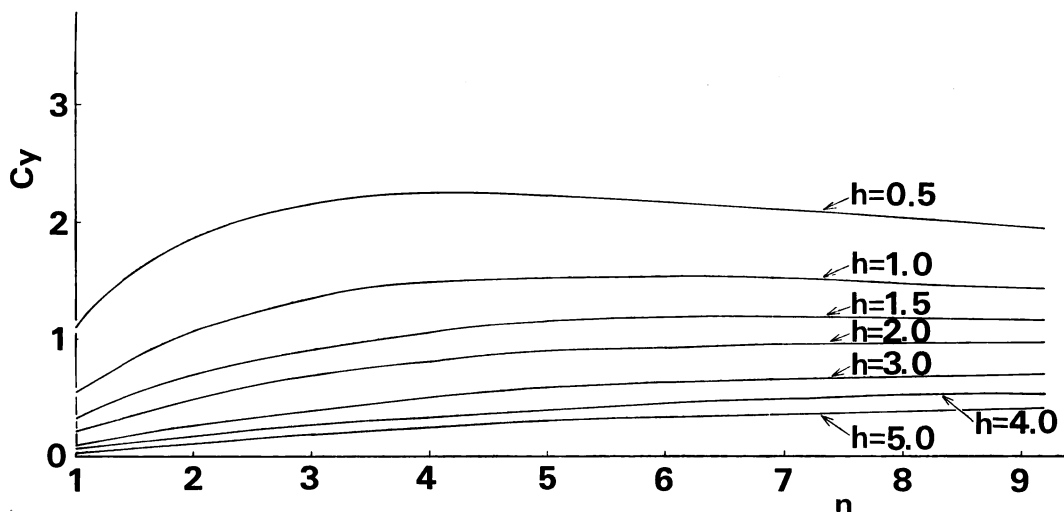


Fig. 17 Relationship between second peak values to n for several h

4. 考 察

2円柱のすれちがい問題の数値解析と、 $1/8$ 縮尺模型を使用して、空気力の天秤による測定とタフト法による可視化の結果から、自転車におよぼす空気力の検討を試みた。

数値計算によると、2円柱の半径比、位置関係によって、第1ピーク時の押し出す力の作用する時間は異なるが、第2ピーク時の吸いこみの時間は、2円柱がもっとも接近したときに一致している。しかも、第2ピーク時の C_p の値は、間隔が小さいほど、大きくなり、吸いこみの力は大きい。

模型実験の結果では、数値計算にみられる位置に、第1ピークの押し出しも第2ピークの吸いこみもみられない。これは、そのような空気力が存在し得ないのか、天秤の感度上測定不可能な程、微小なものか、それとも、自転車の側面積が、自動車の側面積にくらべて小さいためか、判定でき

なかった。しかし、実験結果において検出された最初にあらわれる押し出す力は、流れの可視化によると、自動車前端側面付近で外向きに流れが発生しているために作用していると考えられる。つづいて起る吸いこみは、最初の押される力による慣性によるものなのか、自動車の側面に発生する、はく離流によるものか判定できなかった。いづれにしろ、実験結果の押し出しと吸いこみは、粘性の影響や、はく離流による影響が考えられるが、数値計算では、理想流体で解かれているために、物体後半部より後方の流れについて整合性が得られないのは当然である。

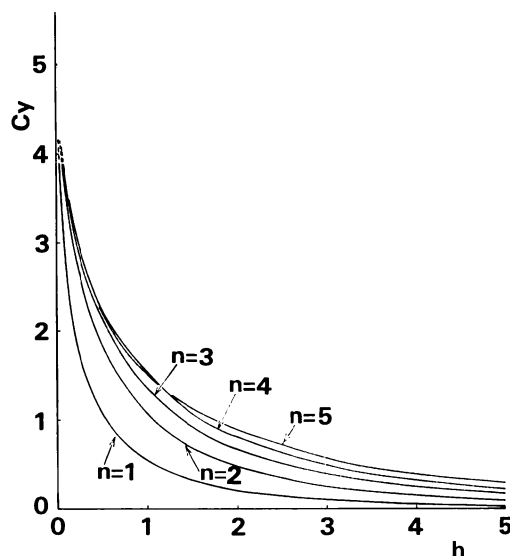


Fig. 18 Relationship between second peak values to h for several n

5. あとがき

今回の報告は、 $\frac{1}{6}$ 縮尺模型による実験と、2円柱のすれちがう問題の数値計算の結果との比較検討を主眼に置いた。

これらの結果から実際の自転車に加わる空気力を定量的に算出し、ふらつきの解明を、云々することは、まだ十分とはいえない。

しかしながら、自転車の左側を、自動車が後方から接近してくるとき、まず心理的にも空力的にも、左側へ押されることが十分予想される。すなわち、重心およびハンドル操作が左方向に移動することになる。この結果として、直進性を保持するために、重心およびハンドル操作を右方向にもどす動作が行なわれるものと考えられる。この復元動作と自動車のすれちがいの時の空力的な吸いこみが一致すると、自転車の乗り手は、必要以上の吸いこみを受けたと感じることも予想される。

これらの現象をさらに究明するために、今後、 $\frac{1}{6}$ 縮尺模型実験での天秤の改良と、流れの可視化の改良による実験的解明と、自転車と自動車系のすれちがいの問題により近似した理論的解析を行なう必要がある。

参 考 文 献

- 1) Mitutosi Kawaguti : The Flow of a Perfect Fluid around Two Moving Bodies, Journal of the Physical Society of Japan, Vol. 19, No. 8, August, 1964.
- 2) F. N. Beauvais : Aerodynamic Inputs to a Parked Vehicle Caused by a Passing Bus, SAE Automotive Engineering Congress, Detroit, Mich. January 12-16, 1970.
- 3) 加藤, 松田 : 歩行者の近傍を通過する自動車が歩行者に及ぼす空気力学的影響 (第1報 人体模型用空力天秤の試作と予備的実験), 大阪産業大学論集自然科学編, 37号, 昭和48年2月1日。
- 4) 加藤, 松田他 : 歩行者の近傍を通過する自動車が歩行者に及ぼす空気力学的影響, 日本自動車研究所研究報告, 第15号, 昭和49年8月。
- 5) L. H. Carpenter : On the Motion of Two Cylinders in an Ideal Fluid, J. Res. Nat. Bur. Stand, 61, 1958.