1. 目的

車体形状は自動車の空力特性に大きく影響を及ぼすので、設計に際しては車体近傍の流れ の挙動をよく把握しておく必要がある.本実験では二次元車体模型を用い,マノメータによ る模型表面の圧力分布計測,ピトー管による模型前後断面の流速分布の計測,および表面タ フト法による流れの可視化を行い,これらの原理や実験方法について理解する.また,物体 表面の圧力分布より抗力,揚力が算出できることを確認し,さらに運動量の法則からも抗力 が算出できることを理解する.

2. 実験装置

図1に実験装置の概要を示す.装置は風洞(送風口;400×400mm),送風機,三相モー タ、二次元車体模型,圧力切換コック、ゲッチンゲン型マノメータ、ピトー静圧管、ベッツ 型マノメータよりなる.三相モータのスイッチを入れることにより送風機より風洞部に空気 が送られ、テストセクション部に乱れの少ない一様流が得られる.二次元車体模型には、模 型中央断面上の表面に圧力測定孔が開けられており、さらに表面には流れの可視化のための 表面タフトが貼られている.圧力測定孔はビニル管で圧力切換コックに連結され、ゲッチチ ンゲン型マノメータ(アルコール)で模型表面の圧力が測定される.二次元車体模型前後の 流速分布測定にはピトー静圧管が使用される.ピトー静圧管からの圧力はビニル管でベッツ 型マノメータ(純水)に連結され、総圧と静圧の差を測定することにより流速が算出される. 二次元車体模型はアクリル製であり、断面形状は図2のとおりである.模型の奥行き寸法は 800mmで、中央断面上に設定されている圧力測定孔の位置も図2に示されている.







3. 基礎事項

3.1 マノメータの原理



液体の圧力を,密度の分かっている液体の液柱の重量とつりあわせ,その液柱の長さを測定して圧力を求める圧力計をマノメータという.液体は,圧力が比較的高い時には水銀,低い時には水やアルコールが使用される.

(1) 通常マノメータ

図3に通常マノメータの原理図を示す.(a)は,容器の中の圧力を,容器内の液体と同じ 液体の液柱によって測定するものである.点Aの圧力pは,

 $p = p_0 + \rho g H$

ここに, p₀は外気圧力, は液体の密度, g は重力加速度, H は測定する点 A から測った 液面の高さである.

(b)は, 点Aの圧力が大きく(a)の方法では液柱が高くなりすぎる時,液注を密度の大きい液体(例えば,水に対して水銀など)によって置き換えて圧力を測定する場合を示している. HとHを測定すれば,点Aの圧力が次式で求まる.

$$p = p_0 + \rho' g H' - \rho g H$$

ただし, 'は置き換えた液体の密度である.

(2)示差マノメータ

示差マノメータは、二つの圧力の差を測定するもので、図4にその測定原理を示している. 図の(a)は、液体または気体の圧力差 pを、それより密度の大きい液柱によって測定する 場合を示している.液柱Hを測定すれば、

$$p = (\rho' - \rho)gH$$

から,圧力差 pが求まる.(a)のようなマノメータをその形からU字管マノメータという. 1本のU字管マノメータでは液柱Hが大きすぎて測定できない場合,2本以上のU字管マ ノメータを直列に連結し,液柱の全長Hを分割して測定すればよい.そのようなマノメー タを多管マノメータと呼ぶ.

(b)は, 原液より軽い液体('<)を使用する場合で, 圧力差 pは,

$$p = (\rho - \rho')gH$$

で求められる.

気体の液柱差を測定する場合には,(a)と同様にして, を気体, 'を水などの液体として使用することで測定できる.圧力差が小さい場合,(c)のように密度の近い2種類の液体

1,2 を用いると,液柱を拡大して測定することができる.二つの小タンクの断面積が等しいとしてこれをAとすうると,圧力差がないときの両液の境界面に対し,圧力差 pを加えたときに境界面がHだけ下降したとすれば,圧力差 pは次式によって表される.

$$p = \left| \left(\rho_2 - \rho_1 \right) + \left(\rho_1 + \rho_2 \right) \frac{a}{A} \right| gH$$

面積比 a/A が十分小さければ , 上式は次のようになる . $p = (
ho_2 -
ho_1)gH$

今回使用するマノメータでは図 5 のように,基準圧力 p₀,測定圧力 p,マノメータのヘッドh,指差液体の密度 pliq,空気の密度 pair,重力加速度 g とすると,A 点と B 点の圧力は等しいことにより次式を得る.

$$p + \rho_{air}gh' = p_0 + \rho_{lig}gh$$

ここで, liq airを考慮すると次式となる.

$$p - p_0 = \rho_{liq} gh$$

式(1)より,マノメータのヘッドh,指差液体の密度 liq および重力加速度gを知れば,測 定圧と基準圧との差圧 $p - p_0$ が得られる.



3.2 ピトー静圧管の原理



ピトー管は,1732年にフランスの Pitot によって考案され,その後改良が行われて,現 在でも流速の測定に広く使用される歴史の古い流体計測器である.図6の(a)のように先 端部を流れに向けて全圧を測定するものを全圧管またはたんにピトー管といい,(b)のよ うに管の側面に静圧測定孔をあけて静圧を測定するものを静圧管という.また,(c)のよ うに全圧管と静圧管を同心に組み合わせ,全圧と静圧の差から直ちに動圧が測定できるよう にしたものをピトー静圧管, あるいはこちらもたんにピトー管と呼ばれることもある. ピトー管を用いて全圧 p1 と静圧 p2 との差圧(p1 - p2)を測定すれば, ベルヌーイの式よ り導かれる次式によって流速を求めることができる.

ベルヌーイの式:
$$\frac{p_1}{\rho_1} + \frac{v_1^2}{2} + gz_2 = \frac{p_2}{\rho_2} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2$$

ただし, $\rho_1 = \rho_2 = const = \rho$, $z_1 = z_2$ とし,また,よどみ点よりv₂=0なので,上式は,

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_2}{\rho}$$
 (2)

$$\Leftrightarrow \quad v_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho}(p_2 - p_1)} \tag{3}$$

また,よどみ点圧力 p2は,式(2)より次のように書き換えられる.

$$p_2 = p_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} \tag{4}$$

よって,マノメータにより $p_1 - p_2 = \rho_{lia}gH$ を測定すれば式(3)より速度 v_1 が求まる.

$$(3) \Leftrightarrow v_1 = \sqrt{\frac{2}{\rho_{air}} (p_2 - p_1)} = \sqrt{2 \frac{\rho_{liq} gH}{\rho_{air}}}$$
(5)

実際には,静圧測定孔の位置やピトー管形状により式(5)を補正した次式を用いる.

$$v_1 = k \sqrt{2 \frac{\rho_{liq} gH}{\rho_{air}}} \tag{6}$$

ここで, k はピトー管係数である. ピトー管の全圧測定孔の指示圧は, 孔径がある大きさ を保つため, 真の全圧を指示しない.また, 静圧測定孔の指示圧はピトー管の頭部と下流側 支柱の影響を受けて必ずしも真の静圧を示さない.したがって,製作した個々のピトー管係 数がそれぞれ異なるので使用に先立ってあらかじめ測定しようとする流速の範囲で概知の 流速のもとでピトー管係数 k をあらかじめ校正しておく必要がある.

ただし,標準形のピトー管では広範囲の流速に対してほとんど k=1.0 に近い値であるため,標準形ピトー管は式(5)で流速を表現することができる.

標準形ピトー管



図7に最も広く使用されている代表的なピトー管を示している.(a)の寸法比を持つピトー管をプラントル型(あるいはゲッチンゲン型)ピトー管という.先端は半球形をなし,側面の静圧測定孔は円周全体にわたって隙間になっている.(b)に示す寸法比のものは,(a)のゲッチンゲン型ピトー管を改良してJIS規格に採用されているJIS標準形ピトー管である.(c)はNPL形ピトー管と呼ばれ,イギリス国立物理研究所(National Physical Laboratory)で考案されたものである.図7のいずれのピトー管も,ピトー管頭部および支柱の影響が打ち消しあって,全圧孔と静圧孔の差($p_1 - p_2$)に対してピトー管係数が1.00かそれにきわめて近い値になるように,全圧測定孔の大きさ,静圧測定孔の位置などが決められている.したがって,これらの標準形ピトー管を使用すると,校正試験を行わないで流速を測定できる利点がある.

ピトー管を流れに対して傾けて挿入すると,圧力測定孔の指示圧は正しい値を示さない. 図8は,ゲッチンゲン型ピトー管が流れに対して角度 傾いておかれた時の指示圧の変化 (p)を示している.動圧を正しく測定するには,ピトー管の傾きをできるだけ小さくす る必要があることが分かる.

境界層内の固体壁面近くのように,速度勾配の大きい流れを測定する場合には,ピトー管 まわりの流れが偏るため,全圧測定孔の指示圧はピトー管中心位置の流れの全圧を指示しな い.その測定誤差はピトー管の外径が小さいほど小さいピトー管や先端を扁平につぶしたピ トー管を用いるのがよい.



か:全圧、か:静圧、か:動圧 (話字0は傾きなし、話字0は傾き角0を意味する) 図8 ゲッチンゲン型ピトー管の方向特性

今回使用するピトー静圧管は,図9(p.7)のように二重の管から構成されている.内管 は先端 B で開いており,内管と外管の間は先端 B で閉じており,側面 C に小孔が空けられ ている.ここでは空気の流速測定を考える.A 点と B 点の間でベルヌーイの式を適応する と式(2)を用いて次式が得られる.

 a^{1}

よって,

$$\frac{p_{air}v}{2} + p_0 = p_B$$

$$v = \sqrt{2\frac{p_B - p_0}{\rho_{air}}}$$
(7)

ここで C 点の静圧は大気圧 p₀であるので, B 点と C 点との圧力差にマノメータの式(1)を 適応すると次式となる.

$$p_B - p_0 = \rho_{liq} gh \tag{8}$$

式(8)を式(7)に代入すると次式を得る.

$$v = \sqrt{2\frac{\rho_{lig}gh}{\rho_{air}}} \tag{9}$$

式(9)より,マノメータのヘッドh,指差液体の密度 liq,空気の密度 air および重力加速 度gを知れば,気流の流速 v が得られる.



3.3 流れの可視化

目では観察できない流れを何らかの工夫で観察可能にする技術を流れの可視化という 流 れの可視化は,流れを直感的に把握できることおよび比較的簡単に応用できることから,工 学,工業の分野でも広く利用されている.このような流れの可視化手法としては,壁面トレ ース法,タフト法,注入トレーサ法,化学反応トレーサ法,電気制御トレーサ法,光学的可 視化法があるが,流体の種類や観察の目的と対象などによって適・不適があるので,事前に 十分な検討を行う必要がある.

本実験で行う壁面タフト法は、物体表面にタフト(流れの挙動を観察するのに使う糸など) を貼り付け,物体表面の流れ方向,はく離域および不安定域などを可視化するものである.

<タフト法>

流れの中に短い糸などのタフトを挿入し、その挙動から流れ方向や安定度、剥離域の存在 などを調べる方法である.観測の目的に応じてタフトの一端を壁面に接着する場合や、支柱 を使って流れの中にグリッド状に配列する場合がある.タフトの材料としては軽くてよりの 少ないものがよい.気流に対して、日本刺繍用絹糸や毛糸が一般的に使用され、風速が遅い ときには、絹の単繊維やタンポポが用いられることもある.水流に対しては、ナイロン、絹、 あるいは麻などの糸がよい.

タフト法は,気流および水流の低速から高速までの広い速度範囲に適用することができ, 風洞や水槽を汚染することなく手軽に実施できるため,学生実験などには最適である.固体 表面近くの流れなど不安定な流れにおいては,タフトや支柱の取り付けによって本来の流れ が影響を受けないように注意が必要である.

3.4 流体力による抗力,揚力

図 10 のような二次元物体を考える. 奥行き単位幅あたりに働く力は,物体表面の圧力p を物体表面 S に沿って積分することにより得られる. このとき,流れ方向に働く力を抗力 D,流れと垂直方向に働く力を揚力Lとすると,これらは次式により与えられる.

$$D = \oint (p \sin \theta + \tau_w \cos \theta) dl = D_p + D_f$$
$$L = \oint (-p \cos \theta + \tau_w \sin \theta) dl = L_p + L_f$$

ここで、wは壁面せん断応力であり、D_p, L_pは圧力分布により生じる圧力抗力および圧力揚力(形状抗力・形状揚力ともいう)と呼ばれ、D_f, L_fはせん断応力に起因するもので摩擦抗力および摩擦揚力と呼ばれる.抗力Dに占める Dp,Df の割合は、物体形状により大きく異なる.代表的な形状に対して、その割合を表1に示す.一般的に、流線形物体で流れの剥離を生じない場合は D_p < D_fで、円柱や流れに対して直角に置いた平板のように、大きい剥離域を持つ物体に対しては D_p > D_f となり抗力は流線形物体に比べ大きくなる.今回の測定形状は、図2(p.2)を見ても分かるようにくさび形状となっているので D_p D_f とし、 $D_f \approx 0$ とすると抗力Dは次式となる.

$$D = \int_{a} p \sin \theta \cdot ds \tag{10}$$

また,揚力は圧力分布からの寄与がほとんどであり抗力同様に $L_f \approx 0$ とできるので,揚力も次式のように書き換えることができる.

$$L = -\int_{S} p \cos \theta \cdot ds \tag{11}$$



▲ (円桂は Re = U _n d/y が約 200 の場合)							
形状	压力抗力 D _p [%]	摩擦抗力 D _r (%)					
==:	0	100					
	≃10	$\simeq 90$					
02,00	=90	$\simeq 10$					
₹ 1 3.00	100	0					

表1 種々の形状物体における D₂ と D₂ の割合 (円柱は Re=1Ld/2 が約200 の場合)

3.5 運動量の法則

図 11 に示す一様流中の物体まわりの流れを考える.物体まわりに十分大きな検査面を考えるとき,運動量の法則は次のように表現される.

「検査面を通って外側に輸送される単位時間あたりの運動量は検査面に含まれる流体部分 に働く力の総和に等しい」

これを数式にすると次式となる.

$$J = G \tag{12}$$

ここで,

J:単位時間あたりに検査面を通って外へ出る運動量ベクトル

G:流体部分に働く力の総和

である.以下で二次元物体まわりの単位幅あたりの運動量の法則の適応を考える.検査面 AB'BA'を物体から十分に離して設定すると AB と A'B'は平行でかつ流線とも平行に設定で き,さらにこの検査面上の静圧は大気圧に等しいと考えてよい.このとき,流れ方向の流速 v,流れと垂直方向y,流体の密度 とすると運動量Jは次式で与えられる.

$$J = \int_{B}^{B'} \rho v^2 dy - \int_{A}^{A'} \rho v^2 dy$$

また,物体が流体から受ける抗力ベクトルDは次式となる.

$$\mathbf{D} = -\mathbf{G}$$

これらを式(12)に代入すると次式を得る.

$$D = \int_{A}^{A'} \rho v^{2} dy - \int_{B}^{B'} \rho v^{2} dy$$
 (13)

ここで、物体の影響は物体後流のわずかな伴流と呼ばれる部分のみに現れることに注目する. 伴流を包み込む流線に沿って ab, a'b'を設定し,検査面 abb'a'について運動量の法則を適応 すると次式を得る.

$$D = \int_{a}^{a'} \rho v^2 dy - \int_{b}^{b'} \rho v^2 dy$$
 (14)

断面 aa'での流速は一様速度 U₀であり,また連続の式より,

$$\int_{a}^{a'} \rho v^2 dy = \int_{b}^{b'} \rho v^2 dy$$

が成立するので,次式を得る.

$$D = \int_{b}^{b} \rho v (U_{0} - v) dy$$
 (15)

式(15)により,一様流の流速 U₀,物体後方の伴流部における流速分布,および流体の密度 を知れば,二次元物体に働く抗力を算出することができる.



4. 実験方法

4.1 物性値と代表値

重力加速度は,g=9.80665 [m/s²]とする.

ベッツ型マノメータには純水が、またゲッチンゲン型マノメータにはアルコールが指差液体として使用されているので、マノメータにより圧力を測定するためにはこれら指差液体の密度を知る必要がある(式(1)).ここでは、純水の密度は Aq=1000.0[kg/m³]とする、アルコールの密度 Alc は密度の検定グラフを用いて、アルコールの温度の関数として与える、

ピトー静圧管により気流の流速を測定するためには、マノメータの指差液体の密度に加えて、空気の密度も知る必要がある(式(9)). ここでは空気を理想気体と考え、状態方程式より密度を算定する.気温 T*=273.15 [K]、気圧p*=760 [mmHg]での空気の密度は *= 1.2932 [kg/m³]であることを用いれば、気温 T [K]、気圧p [mmHg]での空気の密度 air [kg/m³]は次式で与えられる.

$$\frac{p_*/\rho_*}{p/\rho_{air}} = \frac{RT_*}{RT}$$

$$\rho_{air} = \rho_* \frac{T_*}{T} \frac{p}{p_*} \quad [kg/m^3]$$
(16)

空気の粘性係数の算定には, Sutherlandの式を用いる.気温 T_{*} = 273.15 [K]での粘性係数 µ_{*} = 1.724 × 10⁻⁵ [Pa・s],および定数 S₁ = 110.4 [K]により,気温 T [K]での空気の粘性係数 µ_{air} [Pa・s]は次式で与えられる.

$$\mu_{air} = \mu_* \frac{S_1 + T_*}{S_1 + T} \left(\frac{T}{T_*} \right)^{\frac{3}{2}} \quad [\mathbf{Pa} \cdot \mathbf{s}]$$
(17)

空気の動粘度は定義より $v_{air}=\mu_{air}/
ho_{air}$ [m²/s]である.

代表長さ L₀ としては,二次元車体模型の高さを選び,図2より L₀ = 0.09 [m]とする. 代表速度 U₀には,ピトー静圧管による測地結果より 断面 - の流速の最大値を取る. レイノルズ数 Re は定義より,

$$\operatorname{Re} = \frac{U_0 L_0}{V_{\text{oin}}}$$

と計算できる.

4.2 ピトー静圧管による流速分布の計測

二次元車体模型前後断面における流速を調べるためにピトー静圧管を用いる 測定は模型 前面より前方 15[cm]の断面 - と,模型後面より後方 15[cm]の断面 - の2断面で行 う(図 12 参照).模型の下面を y = 0[cm]とし, y = -16 [cm]から y = 16 [cm]まで2 [cm] 間隔でピトー管を主流方向に向けて設定し,ベッツ型マノメータ(純水)でヘッド h_{Aq}を測 定する.式(9)を用いると流速 v は次式により与えられる.

$$v = \sqrt{2 \frac{\rho_{Aq} g h_{Aq}}{\rho_{air}}} \tag{18}$$

流速 v は代表流速 U₀により無次元化しておく.



4.3 表面タフト法による流れの可視化

二次元車体模型の表面に貼り付けてある表面タフトの様子を各自スケッチする.このとき, とくにタフトの方向と振れに注目して流れ場を観察する.

4.4 模型表面圧力分布の計測

二次元車体模型表面の圧力分布を調べるため,模型表面に設けられた No.1 から No.43 までの圧力測定孔における圧力を測定する.圧力切換コックは1~20 番までであるので,まず No.1 から No.20 番の圧力,次に No.21 から No.40 番の圧力,最後に No.41 から No.43 番の圧力を圧力切換コックにつなぎ,順番にゲッチンゲン型マノメータ(アルコール)でヘッド h Alc を測定する.ヘッドが負の場合は,正負切換弁を負の位置にセットすると h Alc が 正の値として読み取れるので,正負の符号を間違えないように記録する.式(1)を用いると, 模型表面の圧力 p と大気圧 po との圧力差 p - po は次式により与えられる.

$$p - p_0 = \rho_{Alc} g h_{Alc} \tag{19}$$

なお , 圧力差p‐p₀は次式のように無次元化される .

$$C_{p} = \frac{p - p_{0}}{\frac{1}{2} \rho_{air} U_{0}^{2}}$$
(20)

Cp は圧力係数と呼ばれる.

5. 測定

5.1 物性値と代表値

実験時の気温・気圧は,

式(16)より空気の密度は,

(16)
$$\rho_{air} = \rho_* \frac{T_*}{T} \frac{p}{p_*} = 1.2932 \times \frac{273.15}{300.15} \times \frac{766.9}{760} = 1.186 \text{ [kg/m^3]}$$

空気の粘性係数は式(17)の Sutherland の式より,

(17)
$$\mu_{air} = \mu_* \frac{S_1 + T_*}{S_1 + T} \left(\frac{T}{T_*} \right)^{\frac{1}{2}} = 1.724 \times 10^{-5} \times \frac{110.4 + 273.15}{110.4 + 300.15} \times \left(\frac{300.15}{273.15} \right)^{\frac{1}{2}} = 1.857 \times 10^{-5} \quad [\mathbf{Pa} \cdot \mathbf{s}]$$

したがって,空気の動粘度は定義式より,

$$v_{air} = \frac{\mu_{air}}{\rho_{air}} = \frac{1.857 \times 10^{-5}}{1.186} = 1.565 \times 10^{-5}$$
 [m²/s]

よって,流れのレイノルズ数は,代表長さに二次元模型の高さを,代表速度に上流速度の最 大値をとって(5.2節・表2参照),

L₀ = 0.09 [m], U₀ = 28.2 [m/s]
Re =
$$\frac{U_0 L_0}{V_{oir}} = \frac{28.2 \times 0.09}{1.565 \times 10^{-5}} = 1.62 \times 10^5$$

5.2 ピトー静圧管による流速分布計測

ピトー静圧管によって測定した,上流および下流のマノメーター指差h_{Aq} およびその値 を式(9)に当てはめて流速 v と v を代表速度で割った無次元値を表 2 に示す.

上流断面 -				下流断面 -			
y [cm]	h _{Aq} [mmAq]	u [m/s]	u/U ₀	y [cm]	h _{Aq} [mmAq	u [m/s]	u/U ₀
16	48.0	28.2	1.00	16	40.7	25.9	0.921
14	42.0	26.3	0.935	14	41.5	26.2	0.930
12	39.9	25.7	0.912	12	45.2	27.3	0.970
10	36.7	24.6	0.874	10	45.2	27.3	0.970
8	35.4	24.2	0.859	8	40.5	25.9	0.919
6	35.5	24.2	0.860	6	24.3	20.0	0.712
4	35.4	24.2	0.859	4	17.2	16.9	0.599
2	35.2	24.1	0.856	2	11.2	13.6	0.483
0	36.5	24.6	0.872	0	13.4	14.9	0.528
-2	37.8	25.0	0.887	-2	16.1	16.3	0.579
-4	39.0	25.4	0.901	-4	23.1	19.5	0.694
-6	41.6	26.2	0.931	-6	30.4	22.4	0.796
-8	43.4	26.8	0.951	-8	39.3	25.5	0.905
-10	46.2	27.6	0.981	-10	42.8	26.6	0.944
-12	46.4	27.7	0.983	-12	43.0	26.7	0.946
-14	42.0	26.3	0.935	-14	40.6	25.9	0.920
- 16	32.8	23.3	0.827	-16	38.3	25.2	0.893
7	ゴ均	25.6	0.907				

表2 ピトー静圧管による流速分布計測

5.3 表面タフト法による流れの可視化スケッチ

測定模型につけられたタフトの様子をスケッチしたものを図13に示す.



図13 タフトのスケッチ

図13をみてもわかるように,AB面ではタフトが流れ方向と逆向きとなった.また,図 でも示すように何箇所かタフトが不安定に動く箇所があり、特にDE面で流れが不安定であ ることがタフト観察によってわかった.

5.4 模型表面圧力分布計測

模型表面の圧力分布は図 14 に示した 43 箇所を測定する.各面の測定したマノメータ指差とその値を式(19)に当てはめた圧力差,および式(20)より求めた圧力係数を表3~9に示す.なお表のナンバーは図 14 の番号を示す.



図14 圧力測定位置

					p 1
No.	x [mm]	x [mm]	h _{Alc} [mm]	p-p ₀ [Pa]	Cp
1	15	20	-17.65	-139.2	-0.2957
2	25	10	-19.85	-156.5	-0.3326
3	35	10	-22.75	-179.4	-0.3812
4	45	10	-18.95	-149.4	-0.3175
5	55	10	-16.50	-130.1	-0.2764
6	65	10	-13.55	-106.9	-0.2270
7	75	10	-5.70	-45.0	-0.0955
8	85	10	-1.30	-10.3	-0.0218

表3 区間A-B マノメータの測定値および圧力係数C。の算出

						· / · · · · · ·
	No.	x [mm]	x [mm]	h _{Alc} [mm]	p-p ₀ [Pa]	Cp
	9	95	10	3.20	25.2	0.0536
	10	105	10	11.95	94.24	0.2002
_	11	115	10	10.40	82.02	0.1742
	12	125	10	1.70	13.4	0.0285
_	13	135	10	-9.05	-71.4	-0.1516
_	14	145	10	-52.40	-413.3	-0.8779

表4 区間B-C マノメータの測定値および圧力係数C。の算出

表5 区間C-D マノメータの測定値および圧力係数C。の算出

No.	x [mm]	x [mm]	h _{Alc} [mm]	p-p ₀ [Pa]	Cp
15	155	10	-80.85	-637.6	-1.355
16	165	10	-54.15	-427.1	-0.9072
17	175	10	-42.75	-337.1	-0.7162
18	185	10	-40.55	-319.8	-0.6794
19	195	10	-7.15	-56.4	-0.120
20	205	10	-42.45	-334.8	-0.7112
21	215	10	-2.80	-22.1	-0.0469

表6 区間D-E マノメータの測定値および圧力係数C。の算出

					rat p r
No.	x [mm]	x [mm]	h _{Alc} [mm]	p-p ₀ [Pa]	C _p
22	225	10	-63.10	-497.6	-1.057
23	235	10	-10.05	-79.26	-0.1684
24	245	10	-30.40	-239.7	-0.5093
25	255	10	-23.30	-183.8	-0.3904
26	265	10	-17.60	-138.8	-0.2949
27	275	10	-13.50	-106.5	-0.2262
28	285	10	-10.55	-83.20	-0.1768
29	295	10	-8.20	-64.7	-0.137
30	305	10	-5.85	-46.1	-0.0980
31	315	10	-4.20	-33.1	-0.0704
32	325	20	-2.70	-21.3	-0.0452

区間 E - F マノメータの測定値および圧力係数 C_pの算出 表7 y [mm] h_{Alc} [mm] p-p₀ [Pa] No. y [mm] Cp -0.35 -2.8 -0.0059 33 35 10 -0.75 -5.9 34 25 10 -0.013 35 15 20 -0.30 -2.4 -0.0050

表	8 区間 F - G マノメータの測定値および圧力係数 C 。の第						
	No.	x [mm]	x [mm]	h _{Alc} [mm]	p-p ₀ [Pa]	Cp	
	36	305	65	3.05	24.1	0.0511	
	37	245	60	-4.00	-31.5	-0.0670	
	38	185	65	-21.30	-168.0	-0.3569	
	39	115	70	-32.40	-255.5	-0.5428	
	40	45	80	-36.60	-288.6	-0.6132	

쿶 出

表9	区間G-A	マノメータの測定値および圧力係数C	。の算出
----	-------	-------------------	------

No.	y [mm]	y [mm]	h _{Alc} [mm]	p-p ₀ [Pa]	Cp
41	15	20	78.05	615.5	1.308
42	25	10	81.55	643.1	1.366
43	35	10	80.25	632.9	1.345

6. 課題と考察

6.1 流速分布グラフ

模型前後および代表速度U₀の流速分布を図 15 に表す. また,後流の速度分布は正規分布になることが知られており,次式で表現できる.

$$u(y) = U_0 - u \cdot \exp\left[-0.698 \left(\frac{y-m}{b_{1/2}}\right)^2\right]$$
(21)

ただし,座標 y₁, y₂(y₁ > y₂)は,速度欠損 u=(U₀ - u)の最大値の 1/2 になる座標とする. また, $m = (y_1 + y_2)/2$, $b_{1/2} = (y_1 - y_2)/2$ とする.ここで, $b_{1/2}$ は半値幅と呼ばれ,自由 乱流の速度分布を特徴付ける代表長さとして用いられる.

先の表2(p.12)を用いて速度欠損 uを表10に示す.

下流断面 -						
y [cm]	u [m/s]	U ₀ -u [m/s]				
16	25.9	2.23				
14	26.2	1.98				
12	27.3	0.834				
10	27.3	0.834				
8	25.9	2.29				
6	20.0	8.13				
4	16.9	11.3				
2	13.6	14.6				
0	14.9	13.3				
-2	16.3	11.9				
-4	19.5	8.63				
-6	22.4	5.75				
-8	25.5	2.68				
-10	26.6	1.57				
-12	26.7	1.51				
-14	25.9	2.26				
-16	25.2	3.01				

表10 下流面の速度欠損 u

:.
$$u = 14.6 \text{ [m/s]}$$

$$\frac{u}{2} = \frac{14.6}{2} = 7.30$$
 [m/s]

したがって, y₁は $6 \le y_1 \le 8$ [cm], y₂は $-6 \le y_2 \le -4$ [cm]の範囲にあり, 直線補間によって求めることとする.よって,

$$y_{1} = 6 + 2 \times \frac{7.30 - 8.13}{2.29 - 8.13} = 6.29 \text{ [cm]}$$

$$y_{2} = -4 + 2 \times \frac{7.30 - 8.63}{8.63 - 5.75} = -4.94 \text{ [cm]}$$

$$m = \frac{y_{1} + y_{2}}{2} = \frac{6.29 - 4.94}{2} = 0.677 \text{ [cm]}$$

$$b_{1/2} = \frac{y_{1} - y_{2}}{2} = \frac{6.29 + 4.94}{2} = 5.61 \text{ [cm]}$$

下	流断面 -			近	以式			
y [cm]	u [m/s]	u/U ₀		u [m/s]	u/U ₀			
16	25.9	0.921		28.09	1.00			
14	26.2	0.930		27.88	0.99			
12	27.3	0.970		27.32	0.97			
10	27.3	0.970		26.04	0.92			
8	25.9	0.919		23.72	0.84			
6	20.0	0.712		20.37	0.72			
4	16.9	0.599		16.74	0.59			
2	13.6	0.483		14.12	0.50			
0	14.9	0.528		13.72	0.49			
-2	16.3	0.579		15.71	0.56			
-4	19.5	0.694		19.17	0.68			
-6	22.4	0.796		22.73	0.81			
-8	25.5	0.905		25.41	0.90			
-10	26.6	0.944		27.00	0.96			
-12	26.7	0.946		27.75	0.99			
-14	25.9	0.920		28.05	1.00			
-16	25.2	0.893		28.14	1.00			

表11 下流速度と近似速度

式(21)で得た近似速度 u もあわせて図 15 に示す.



(1) 上流断面速度についての考察

ー様流のため上流速度は一定のはずである.しかし図 15 で上流断面速度を見ると, y = 16 [cm]やy = -11 [cm]前後では最大速度となっているが,それ以外の区間では速度が減少している.原因があるとすれば次の事項が考えられる.

- マノメータが流れ方向に対して平行になっていない場合.
- 何か抵抗物がある場合.
- 車体模型からの影響
- 送風機が一様流を発生できない場合.

しかし,一項目めのマノメータが原因であれば,測定エラーがあったにしても測定値がU 字型になることが説明できない.したがって,一項目は不適.

二項目めは,上流断面速度の測定値と下流断面測定値を見比べると,速度欠損の量が違う ものの,曲線形状が似通っている.したがって,流れの速度分布を見る限りは上流側もすで に何らかの抵抗物の影響を受けていたとも考えられるが,実験装置を見る限りそのような抵 抗物が見当たらない.

三項目めは 車体模型からの影響 車体模型の前面はよどみ点を持ち 流体が加圧される. その圧力の影響を受けて測定地点の圧力も高くなっていたと考えられる.むろん,圧力が高 くなればベルヌーイの定理より圧力は高くなる.図15をみてもy=0[cm]の地点よりやや 上よりに流速が遅くなっており,これは車体模型の位置と一致する.よって,この三項目め が原因であることが最も現実的と私は考える.

四項目めは考察の対象とはしない.

(2) 下流断面速度についての考察

下流断面速度分布の測定値と近似関数を用いた曲線とを見比べると,曲線の形状は非常に 似通っているのがわかる.しかし, y < -10, 10 < yの範囲では,測定値は速度が減少し ている.その原因としては,下流では送風機の排出口から距離があるため流れが分散してし まい外側の流れが減速してしまっていることが考えられる.

6.2 圧力係数分布グラフ

表3~9で得た圧力係数Cpの値を模型の図に示したものが図16-1である.これは,製 図用ソフトを使って描いたもので、図が少し見づらいのでレポート末尾に方眼用紙に描いた 圧力係数分布図も図16-2として加えておく.



図 16-1 圧力係数分布

ただし,図でも示している通り,測定 No.19,21,23 は異常値とみなして無視することとする.

正圧が作用する部分は, GA 面と BC 面の2箇所のみであり,これは共に空気流が直接 車体に当たる部分である.それに対し背面とその付近は正・負どちらの圧力もかかっていない.また,流体が角になった箇所を通過すると負圧が発生することも見て取れる.

6.3 流れ場の予想

表面タフト法による流れの可視化 模型前後の流速分布および模型表面の圧力係数の分布 を基に流れ場を予想し,模型近傍の流線図を描いたものをレポート末尾の図17に示す. コーナーフローの負圧が発生する部分は剥離が発生すると仮定した.また,圧力の低い部 分はベルヌーイの定理より流速が速くなるため,流線の間隔を短くとってある.

6.4 抵抗係数CDおよび揚力係数CLの算出

模型表面の圧力分布より,抵抗値 D と揚力値 L を算出し,抵抗係数 CD と揚力係数 CL を求める.

抵抗値 D は次のように求められる.

$$D = \int (p - p_0) \sin \theta \cdot ds$$

= $\tan \theta_1 \int_A^B (p - p_0) dx + \tan \theta_2 \int_B^C (p - p_0) dx - \tan \theta_3 \int_D^E (p - p_0) dx - \int_E^F (p - p_0) dy + \int_A^A (p - p_0) dy$
= $\tan \theta_1 \sum_{i=1}^8 (p - p_0)_i \quad x_i + \tan \theta_2 \sum_{i=9}^{14} (p - p_0)_i \quad x_i - \tan \theta_3 \sum_{i=22}^{32} (p - p_0)_i \quad x_i - \sum_{i=33}^{35} (p - p_0)_i \quad y_i + \sum_{i=41}^{43} (p - p_0)_i \quad y_i$

これらの計算結果をまとめたものを表 12~18 に示す.

No.	x [mm]	x [mm]	(p-p ₀) _i [Pa]	x(p-p ₀) _i [Pa·mm]
1	15	20	-139.2	-2784
2	25	10	- 156.5	-1565
3	35	10	-179.4	-1794
4	45	10	-149.4	-1494
5	55	10	-130.1	-1301
6	65	10	-106.9	-1069
7	75	10	-45.0	-450
8	85	10	-10.3	-103
合	ì計	i	$(p-p_0)_i$ $x_i=$	-10600
tan _{1 i} (p-p ₀) _i x _i = -1770				

表12 区間A-B

_					
	No.	x [mm]	x [mm]	(p-p ₀) _i [Pa]	x(p-p₀)i [Pa∙mm]
	9	95	10	25.2	252
	10	105	10	94.24	942.4
	11	115	10	82.02	820.2
	12	125	10	13.4	134
	13	135	10	-71.4	-714
	14	145	10	-413.3	-4133
	合	計		$_i(p-p_0)_i x_i=$	-2700
			tan 2	$_i(p-p_0)_i x_i=$	-1580
	表14 区間C-D				
	No.	x [mm]	x [mm]	(p-p ₀) _i [Pa]	x(p-p ₀) _i [Pa·mm]
	15	155	10	-637.6	-6376
-	16	165	10	-427.1	-4271
	17	175	10	-337.1	-3371
	18	185	10	-319.8	-3198
	19	195	10	-327.3	-3273
	20	205	10	-334.8	-3348
_	21	215	10	-416.2	-4162
				(n n) x -	000

表13 区間 B - C

夜13 区间 D - E					
No.	x [mm]	x [mm]	(p-p ₀) _i [Pa]	x(p-p ₀) _i [Pa·mm]	
22	225	10	-497.6	-4976	
23	235	10	-368.7	-3687	
24	245	10	-239.7	-2397	
25	255	10	-183.8	-1838	
26	265	10	-138.8	-1388	
27	275	10	-106.5	-1065	
28	285	10	-83.2	-832	
29	295	10	-64.7	-647	
30	305	10	-46.1	-461	
31	315	10	- 33.1	-331	
32	325	20	-21.3	-426	
合計 i(p-p ₀)i Xi= -18000			-18000		
tan ₃ _i (p-p ₀); x _i = -7500					

表15 区間 D - E

表16 区間 E - F

No.	y [mm]	y [mm]	(p-p ₀) _i [Pa]	y(p-p ₀) _i [Pa·mm]
33	35	10	-2.8	-28
34	25	10	-5.9	- 59
35	15	20	-2.4	-48
合計		i	(p-p ₀) _i y _i =	-140

表17 区間 F - G

No.	x [mm]	x [mm]	(p-p ₀) _i [Pa]	x(p-p ₀) _i [Pa·mm]
36	305	65	24.1	1570
37	245	60	-31.5	-1890
38	185	65	-168.0	-10920
39	115	70	-255.5	-17890
40	45	80	-288.6	-23090
合	計	i	$(p-p_0)_i$ $x_i=$	-52200

No.	y [mm]	y [mm]	(p-p ₀) _i [Pa]	y(p-p₀) _i [Pa∙mm]	
41	15	20	615.5	12310	
42	25	10	643.1	6431	
43	35	10	632.9	6329	
合計			$_{i}(p-p_{0})_{i}$ $x_{i}=$	25070	

表18 区間G-A

ただし,前述の通り測定点19,21,23は異常点とみなし,値はその前後で直線補間を用いて代入した.

したがって,表 12~18より,

$$D = \tan \theta_1 \sum_{i=1}^{8} (p - p_0)_i \quad x_i + \tan \theta_2 \sum_{i=9}^{14} (p - p_0)_i \quad x_i - \tan \theta_3 \sum_{i=22}^{32} (p - p_0)_i \quad x_i - \sum_{i=33}^{35} (p - p_0)_i \quad y_i + \sum_{i=41}^{43} (p - p_0)_i \quad y_i = -1770 - 1580 + 7500 + 140 + 25070$$

$$= 29400 \quad [mN]$$

$$= 29.4 \quad [N]$$

$$L = -\sum_{i=1}^{8} (p - p_0)_i \quad x_i - \sum_{i=9}^{14} (p - p_0)_i \quad x_i - \sum_{i=15}^{21} (p - p_0)_i \quad x_i - \sum_{i=22}^{32} (p - p_0)_i \quad x_i + \sum_{i=36}^{40} (p - p_0)_i \quad x_i$$

$$= 10600 + 2700 + 28000 + 18000 - 52200$$

 $=7100 \quad [mN]$

$$= 7.10 [N]$$

よって,抵抗係数 C_Dは,

$$C_{D} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho_{air}U_{0}^{2}L_{0}} = \frac{29.4}{0.5 \times 1.186 \times 28.2^{2} \times 0.09} = 0.693$$

揚力係数 CLは,

$$C_{L} = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho_{air}U_{0}^{2}L_{0}} = \frac{7.10}{0.5 \times 1.186 \times 28.2^{2} \times 0.09} = 0.167$$

現在のセダンタイプの自動車の抗力係数は Cp=0.3~0.5 前後.角ばった形状はコーナー フローを持つことになるので剥離しやすく抗力係数を大きくする.そのため近代の自動車は, ほとんどが流線形をしている.測定模型が現代的な形状をしておらず楔形であることを考え れば,得られた値は妥当なものではないだろうか?

抗力の導出式をみると最も抗力を大きくしているのは GA 面,つづいて DE 面であり,ど ちらも直接に風を受ける部分である.乗用車の場合,居住空間を確保する必要性があるため 前面面積が広くならざるをえず,前面の受ける抗力は仕方のない部分がある.したがって, いかに早く後方の圧力回復が行えるかどうかが,抗力を考える上で重要となる.

また,自動車は測定模型のように角ばった楔形をもつ車体でも,リフト方向の揚力を得る ことが測定により明らかにすることができた.むろん,あまりに大きなリフトはタイヤへ伝 わる荷重が小さくなるために操縦性を悪化させてしまう.そのため,できるかぎり揚力は小 さく抑えたいものである.仮に車体上面の圧力を上げる方向に工夫を施したとしよう.その 場合,揚力はダウン方向の力を得て車の操縦性は向上するであろう.しかし,車体上面の圧 力は抗力にも関与しているため、揚力が大きくなれば同時に抗力も大きくなってしまい損失 が大きい.一方, FG 面の車体下面の圧力分布は揚力においてダウン方向に力を与えてい る.また,このFG 面は流れに対して垂直であるため抗力に影響しない.したがって揚力を 扱う際には車体下面の流れが最も重要であることが伺える.

ここで, 揚力と抗力がどの程度のものか概略値を求めてみよう.

抗力係数 $C_D=0.693$,揚力係数 $C_L=0.167$,前面投影面積 S_f = 高さ×横幅 = 1.2[m]×1.5[m] = 1.8[m²],上部投影面積 S_p = 横幅×全長 = 1.5[m]×4.0[m] = 6.0[m²]の車があったとしよう. 国内の高速道路での制限速度は 100[km/s] = 27.8[m/s],常温の空気の密度を = 1.186 とする.

$$D = C_D \cdot \frac{1}{2} \rho_{air} U^2 S_f = 0.693 \times 0.5 \times 1.186 \times 27.8^2 \times 1.8 = 572$$
 [N]

費やされる動力: $P = D \cdot U = 572 \times 27.8 = 15.9 \times 10^3 [W] = 15.9 [kW]$

$$L = C_L \cdot \frac{1}{2} \rho_{air} U^2 S_p = 0.167 \times 0.5 \times 1.186 \times 27.8^2 \times 6.0 = 459$$
 [N]

時速 100 k m で走る車の空気抵抗に費やされる動力は一般的な車の軸出力の1~2割と いった程度.また,車の自重にくらべてリフトの力も小さいので,この程度の揚力はたいし た問題ではなく,我々が高速道路で車を走らせた際に,多少「フワフワした感じ」を受ける 程度であろう.

6.5 抵抗値Dの算出

1

(1)模型の流速を基に,運動量の法則を用いて模型の抵抗値 D を求め,抵抗係数 C_Dを 示す.

式(15)より,

$$D = \int_{b}^{b'} \rho \cdot u(U_0 - u) dy = \rho \int_{b}^{b'} (U_0 u - u^2) dy$$

また,シンプソン則より,

$$\int_{y_0}^{y_n} f(y) dy \approx \frac{y}{3} \left(f_0 + 4f_1 + 2f_2 + 4f_3 + \dots + 2f_{n-2} + 4f_{n-1} + f_n \right)$$
(22)

よって,抗力 Dは,

$$D = \rho_{air} U_0 \int_{-16}^{16} u dy - \rho_{air} \int_{-16}^{16} u^2 dy$$

= 1.186 · 28.2 · $\frac{0.02}{3}$ · 1080 - 1.186 · $\frac{0.02}{3}$ · 25300
= 40.1 [N]

ただし,シンプソン則の計算は表計算を用いた表 19 に示す.

上流断面						
y [cm]	u [m/s]	$u^{2} [m^{2}/s^{2}]$	係数	∙u [m/s]	$\cdot u^2 [m^2/s^2]$	
16	25.9	673	1	25.9	673	
14	26.2	686	4	105	2740	
12	27.3	747	2	54.7	1490	
10	27.3	747	4	109	2990	
8	25.9	670	2	51.8	1340	
6	20.0	402	4	80.2	1610	
4	16.9	284	2	33.7	569	
2	13.6	185	4	54.4	741	
0	14.9	222	2	29.8	443	
-2	16.3	266	4	65.3	1060	
-4	19.5	382	2	39.1	764	
-6	22.4	503	4	89.7	2010	
-8	25.5	650	2	51.0	1300	
-10	26.6	708	4	106	2830	
-12	26.7	711	2	53.3	1420	
-14	25.9	671	4	104	2680	
-16	25.2	633	1	25.2	633	
合計				1080	25300	

表19 シンプソン則の計算の準備

したがって,

$$C_{D} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho_{air}U_{0}^{2}L_{0}} = \frac{40.1}{0.5 \times 1.186 \times 28.2^{2} \times 0.09} = 0.944$$

(2)近似曲線式(21)より抵抗係数を求める.

ヹ(21) ⇔
$$u = U_0 - 14.6 \exp\left\{-0.698\left(\frac{y - 0.677}{5.67}\right)^2\right\}$$

ふたたび,式(15)を用いて計算を行うと,

$$D = \int_{b}^{b} \rho \cdot u(U_{0} - u) dy$$

= $\rho_{air} \int_{-16}^{16} \left(U_{0} - 14.6 \exp\left\{ -0.698 \left(\frac{y - 0.677}{5.67} \right)^{2} \right\} \right) \cdot 14.6 \exp\left\{ -0.698 \left(\frac{y - 0.677}{5.67} \right)^{2} \right\} dy$
= $\rho_{air} \int_{-16}^{16} \left(14.6U_{0} \exp\left\{ -0.698 \left(\frac{y - 0.677}{5.67} \right)^{2} \right\} - 14.6^{2} \exp\left\{ -1.396 \left(\frac{y - 0.677}{5.67} \right)^{2} \right\} dy$

また,図 15 を見ても分かるとおり,式(21)はy < -10, 10 < yの範囲では常に u=1 であるので.

$$D = 14.6\rho_{air}U_0 \int_{-\infty}^{\infty} \left(\exp\left\{-0.698 \left(\frac{y - 0.677}{5.67}\right)^2\right\} \right) dy - 14.6^2 \rho_{air} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-1.396 \left(\frac{y - 0.677}{5.67}\right)^2\right\} dy$$

$$\Xi \Xi \mathfrak{C} \ , \ \frac{y - m}{b_{l/2}} = t \ \mathfrak{C} \mathfrak{B} \lt \mathfrak{L} \ , \ \frac{dy}{dt} = b = 5.67 \times 10^{-2} \ \text{[m]} \ \mathfrak{LOC} \ ,$$

$$D = 14.6 \times 5.67 \times 10^{-2} \rho_{air} U_0 \int_{-\infty}^{\infty} \left(\exp\{-0.698t^2\} \right) dt - 14.6^2 \times 5.67 \times 10^{-2} \rho_{air} \int_{-\infty}^{\infty} \exp\left\{-1.396 \left(\frac{y - 0.677}{5.67}\right)^2\right\} dt$$
$$= 27.66 \times \sqrt{\frac{\pi}{0.698}} - 14.57 \times \sqrt{\frac{\pi}{1.396}}$$
$$= 36.8 \quad [N]$$

したがって,抗力係数は,

$$C_{D} = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho_{air}U_{0}^{2}L_{0}} = \frac{36.8}{0.5 \times 1.186 \times 28.2^{2} \times 0.09} = 0.867$$

である.

よって,得られた抗力係数を比較すると

- 運動量の法則 出口流速;*C_p* = 0.944 近似流速;*C_p* = 0.867
- 圧力分布測定; *C*_n = 0.693

と三者三様の値となった.しかし,圧力分布測定では異常値が複数あり,局所的に近似を行ったため正確なものとはいえない.運動量の法則で出口流速を用いた値は,図15を見ても分かるように,本来は流速が無限遠で一様になるべきであるが,y<-12, 12<yの範囲で流れが外気の影響を受けて減速してしまっている.よって,その部分が正確さにかける.したがって,(2)で行った近似式で抗力係数を求めたものが真値に近いはずである.

6.6 まとめ

圧力分布の測定より求めた抵抗係数と 流速の測定によって求めた抵抗係数とに差が出て いるのが分かる.測定結果も明らかに異常な値が数箇所出ており,圧力測定より抵抗係数お よび揚力係数を測定することの難しさが伺える.

7. 結言

運動量の法則を用いた算出法は,たしかに測定項目や算出は楽であるが,物体(車体)の 状態を無視している面があり,車体の空気の流れを理解すること無しで抵抗値を求めている ので車体のどの部分に抵抗を大きくする要因があるのかなどが全く分からない欠点もある ことがわかった.

参考文献

1)島章・小林陵二 著 水力学(1980) 丸善株式会社 p.176~183, p.196~202

あと,調べるとしたら...

CD 値や CL 値は Re 数によって変化する.円柱や球の抗力係数の変化は文献値として多 いが(図17),このような車体形状の変化値は文献としては少ない(図18),実際のと ころ 5%程度はズレるらしい.



図17 円柱と球の抗力係数の変化

自動車の抗力係数の変化

今回の実験のレイノルズ数は Re=1.62×105.このレイノルズ数の実車での流速は,車 の全高を L=1.2[m]とすると,

$$U = \frac{\text{Re} \cdot \nu}{d} = \frac{1.62 \times 10^5 \times 1.565 \times 10^{-5}}{1.2} = 2.11 \text{ [m/s]} = 7.61 \text{ [km/h]}$$

たかだか,時速7.6kmのCo値がわかっても,抵抗は速度の2乗に比例するので, 重要なのはもっと高い速度の Cn 値である.

もっと高い速度の Cp 値を得るためにはもっと高いレイノルズ数で実験を行う必要が ある.高いレイノルズ数を得る方法としては,

- A) 流速を上げる.
- B) 模型を大きくする.
- C) 流体の密度を上げる.
- **D)** 流体の粘度を下げる.

これらの方法が考えられるが、(A)の流速を増加させる方法は、U=100[m/s]を超える と流体の圧縮率が 5%を超えて ,圧縮性が無視できなくなり流体的相似が満たされなく なってしまう.また,正確な値を出したいのであれば,やはり U=50[m/s]程度に抑え るべきであろう.

(B)の模型を大きくする方法は,もちろん 1/1 スケールの風洞実験装置(もはや施設 か?)を作ることが一番よいのだが,お金がかかるのが一番の難点.1/1スケールの実 験施設建造に必要な額は300億円以上(企業でも結構つらい額である).もちろん,そ んな物を持っているのは、大手自動車メーカーくらいで、大学で持つことなどは不可能 であろう.

また、小さな風洞で大きな模型を用いると、模型の前面投影面積と測定部の断面積の 比(ブロックゲージ比)が大きくなり,模型によって気流が絞られ気流が速くなってし まって誤差が出てしまう.そのため,ブロックゲージ比は10%以下が望ましい.

(C),(D)の流体の密度,粘度,動粘度は,表20のように温度を下げると,密度は上がり,粘度は下がるので動粘度は下がる.したがって,風洞の温度を下げることも有効な手段である.工業的には 100~ 200[]での風洞実験が行われている.

温度 (K)	密度 (kg・m ⁻³)	粘度 (Pa・s)	動粘度 (m ² ・s ⁻¹)
		×10 ⁻⁶	×10-5
100	3.5985	7.060	1.962
150	2.3673	10.38	4.385
200	1.7690	13.36	7.552
250	1.4119	16.06	11.37
263	1.3421	16.70	12.44
273	1.2930	17.20	13.30
283	1.2473	17.69	14.18
293	1.2047	18.17	15.08
300	1.1766	18.53	15.75

表20 乾燥空気の密度と粘度

自動車まわりの流体の流れは,航空機などと違い地面の上を走行するため,地面の影響 を再現する必要がある.最も簡単な方法は,平板を設置することである(図19(a)).こ の方法では,平板上の境界層を除去するためにスリットを切ったり,タイヤと平板に若 干の距離を置く必要がある.ムービングベルトを設置する方法では(図19(b)),気流の 速度に等しい速度でベルトを動かして境界層の発生を防止している.また,ムービング ベルトではタイヤを駆動させた状態の測定が可能である.

