

[総合講座ながれより]

# 自動車の空気力学

## Aerodynamics of Passenger Car

\*日産自動車(株) 石原 裕 二†  
Yuji ISHIHARA

### 1 はじめに

自動車の高速化にともない燃費消費や最高速度に影響する空気抵抗の低減も進んできた。図1は横軸に年代、縦軸に抗力係数  $C_D$  をとったときの乗用車抗力係数の変遷を示している。グラフ中の車両図はその年代の代用的なボディ形状図である。60年代から70年代前半まで  $C_D$  値のトレンドはあまり変化していないが、70年代後半より、オイルショックの影響で抗力係数の低減代が大きくなっているのがわかる。環境問題の高まりとともにこの傾向は続いており、2001年には  $C_D$  が0.25の市販乗用車も現れ始めた。ちなみに、グラフ右下の車両図はFordにおける空力研究車両Ford Probe Vである。

一方、レーシングカーではいろいろな曲率を有するサーキットを高速で走行しなければならず、揚力係数  $C_L$  も重要な要素となる。コーナーリング中の車両横方向加速度を支えるのはタイヤと地面の間の摩擦力であり、これはタイヤの設置加重に摩擦係数  $\mu$  (レーシングタイヤで約1.5) を掛けたもので与えられる。設置加重は車両の自重  $M$  とダウンフォース (負の揚力)  $DF$  の和であり、これらの関係から最大コーナーリングスピード  $u$  に関して次式が得られる。

$$u = \sqrt{\mu gr \left(1 + \frac{DF}{M}\right)}$$

ここで  $g$  は重力加速度,  $r$  はコーナーの曲率半径で

ある。具体例として、ある車両の曲率半径 100m のコーナーにおける最大コーナーリングスピードをダウンフォースの関数として図2に示した。図から明らかなように、もしダウンフォースがゼロであれば 140km/h 弱でしかこのコーナーを抜けられなかったものが、自重と同じだけのダウンフォースが発生できれば、190km/h 以上の速度が出せ、その優位性は明らかである。このためレーシングカーではリアウイングを装着したり、

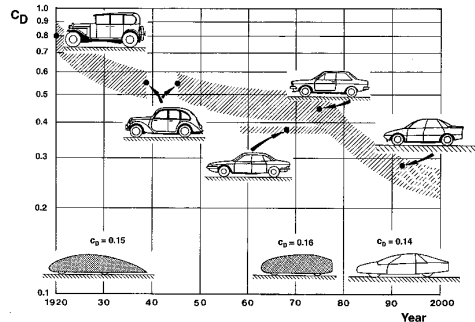


図1 ヨーロッパにおける乗用車の抗力係数  $C_D$  の時代変遷<sup>1)</sup>

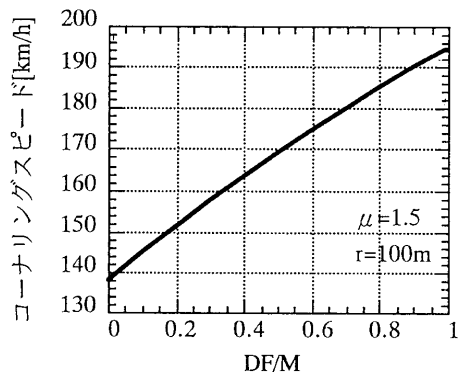


図2 ダウンフォースとコーナーリング<sup>2)</sup>

\* 〒237-8523 横須賀市夏島町1番地

† E-mail: y-ishihara@mail.nissan.co.jp

床下にベンチュリ管効果を持たせる構造にするなどダウンフォースを発生させる工夫をこらしている。

スポーツセダンなどの空力値を重視する新車開発においては、造形デザイナーのスケッチを基に1/4もしくは1/5スケールのクレイモデルを数案作る。この段階で、各案の空力性能を把握するためスケール風洞実験が行われている。これらの空力性能を参照して、フルスケールクレイモデル、試作車の作成へと進んでいく。フルスケールクレイモデル、試作車の空力実験には実車風洞を用いる。このように開発初期にはスケール風洞、開発中後期段階には実車風洞を用いている。一方、モデルが固定地面上に設置されていると、モデルと地面の間に相対速度がなく、実際の流れを模擬していない。この不具合を避けるためには、風洞の一樣流速と同じ速度で移動するムービングベルト装置付風洞を使用することが望ましい。しかしながら、ムービングベルト装置付実車風洞はヨーロッパ自動車メーカー数社のみが所有しているのが現状である。上述のように、レーシングカーでは高いダウンフォースを発生させるよう床下構造を工夫しているが、最近、乗用車においても空気抵抗および揚力低減を目的に床下構造を設計する車両が増えてきている。このような床下の流れが重要な要素になる車両の空力計測には、ムービングベルト付き風洞は不可欠である。そこで、弊社においてはスケール風洞にムービングベルト装置を設置している。

本解説においては、日産自動車の実車およびムービングベルト付スケール風洞の紹介をすると共に、ムービングベルト装置が車の空力性能におよぼす影響を調べるため、ムービングベルトを作動（ON）させた場合と停止（OFF）させた場合とで、乗用車モデル後流の総圧分布計測、および、車体表面圧力計測の結果<sup>4)</sup>について述べる。

## 2 実車風洞

空力特性開発のため多くの自動車メーカーは実車および実車と同スケールのモデルを計測できる

大型の風洞を所有している。この実車風洞を用いて、スケール風洞ではできない、微妙なボディ形状の変更や部品を取り付けた場合の空力性能の変化、および、風音実験等を行っている。図3は日産のゲッチング型実車風洞の外観図である。大小二つの吹出ノズルを上下にスライドさせることにより、最高速度を変えられるようになって

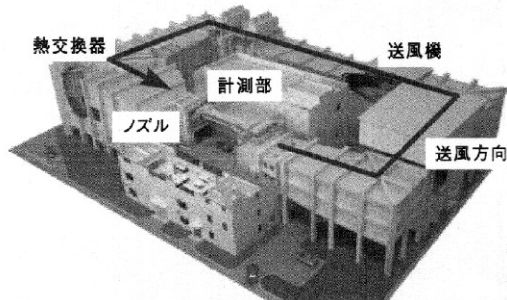


図3 日産実車風洞外観図

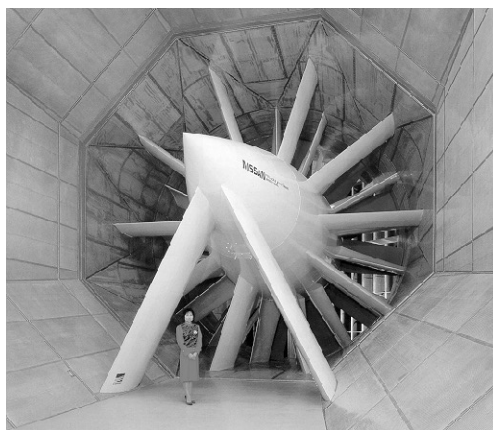


図4 実車風洞送風機



図5 半無響風洞計測室

いる。大小二つのノズル面積は  $28.0\text{ m}^2$ 、 $15.0\text{ m}^2$  で、最高速度はそれぞれ  $190\text{ km/h}$ 、 $270\text{ km/h}$  である。計測部はセミオープンであり、その長さは  $12\text{ m}$  である。図 4 はこの風洞の送風機の写真であり、直径は  $8\text{ m}$  消費電力は  $2,200\text{ kW}$  である。風路の内面全体、および、コーナーペーンに吸音材を装着すると共に、計測部の天井、壁面に吸音くさびを施し、半無響室(図 5) になっている。これにより自動車風洞としては極めて高い静粛性 ( $100\text{ km/h}$  時に  $66\text{ dB-A}$ ) を実現している。さらに詳しい内容は参考文献 3) を見てほしい。

### 3 スケール風洞

図 6 にムービングベルト付きスケール風洞の概略図を示した。これは  $1/5$  から  $1/4$  スケールの乗用車模型の実験用に作られたもので、風洞自体はエッフェル型であるが、流れが循環するように風洞を閉室内に設置した。図 7 は計測部の概略図である。ノズル出口の寸法は  $1.2\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ 、測定部長さは  $2.5\text{ m}$ 、そして最大風速は  $30\text{ m/s}$  である。ムービングベルトの幅は  $920\text{ mm}$ 、ベルトローラ軸間距離は  $1702\text{ mm}$  である。ムービングベルト風上側のトレーリングローラ前には風洞内で発達

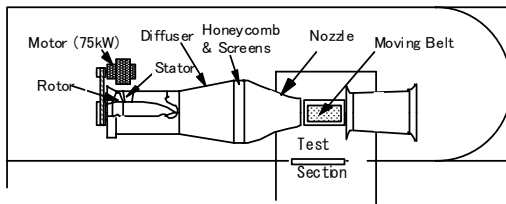


図 6 ムービングベルト風洞概略図

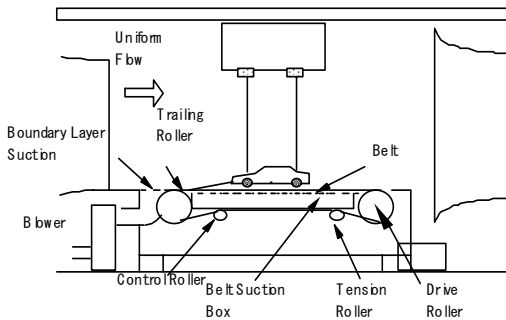


図 7 テストセクション概略図

した境界層を取除く境界層吸込装置が設置されている。さらに詳しい記述が参考文献 5) で述べられている。

### 3.1 ムービングベルト境界層計測結果

ベルト上の境界層の計測結果を図 8 に示す。流速は  $25\text{ m/s}$  であり、図はベルトを真上から見た平面図である。また、図の下、および、右横の数字はベルト前縁から、および、ベルト中心線から各測定点の距離 (mm) をそれぞれ表している。各点の上段がムービングベルトを風洞一様流と同じ速度で運転した場合の境界層厚さ (mm) を、下段がムービングベルトを停止させた場合の境界層厚さ (mm) を示している。但し、両条件とも境界層吸込を作動させた。ここで、境界層厚さは、ベルト表面から最小計測間隔を  $1\text{ mm}$  とし、流速が一様流の  $99\%$  以下となる高さとした。この計測の結果、境界層吸込、および、ムービングベルト共に作動させた場合は境界層厚さがゼロとなった。また、ムービングベルトを停止し境界層吸込のみを作動させた場合には、上流から下流にかけて境界層が発達していることが分かる。 $1/5$  スケール乗用車モデルの場合、ベルト前縁から  $540\text{ mm}$  付近がフロントエンド、また、同じく  $1340\text{ mm}$  付近がリアエンドにあたるが、ベルト中心線上でのそれらの境界層厚さは、それぞれ、 $4\text{ mm}$ 、 $12\text{ mm}$  となっている。乗用車  $1/5$  スケールモデルのシル下地の地上高は  $30\text{ mm}$  前後となるのでリアエンド付近の床下流れのおよそ半分は境界層に含まれてしまう。

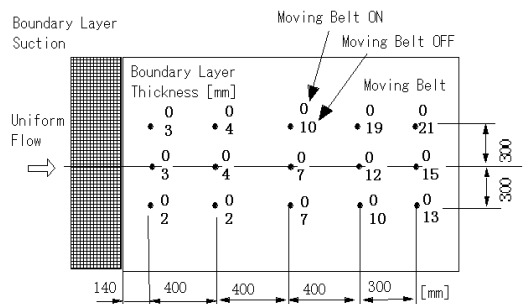


図 8 ムービングベルト平面図上各点の境界層

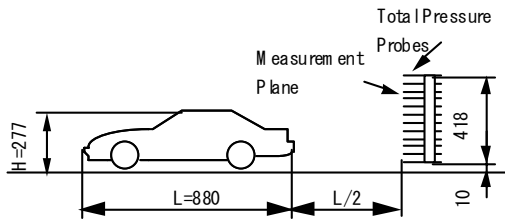


図9 モデルとプローブ

#### 4 モデル後流総圧分布計測実験

筆者らは乗用車スケールモデル後流の非定常総圧分布を、ムービングベルトを作動（以下、ONと記す）させた場合と停止（以下、OFFと記す）させた場合で、計測した結果を報告した<sup>6,7)</sup>。ムービングベルト ON, OFF で後流の総圧分布がどのように変化するかを示すため、その非定常計測の時間平均結果について述べる。

図9は後流計測のためのプローブと模型の関係を示したものである。模型はセダン型乗用車の1/5模型であり、モデルの車長Lは880mm、車高Hは277mm、車幅Wは339mmである。模型全長の半分の長さだけ下流に測定面を設けた。プローブは外径1.6mm、内径1.2mm、長さ150mmのステンレスチューブ252本（縦12×横21）を、縦38mm、横34mmの間隔で束ねてあり、縦418mm（約1.5H）横670mm（約2W）の範囲をカバーする。

風速およびムービングベルト速度は25m/sとした。この場合、模型のホイールベース（前後車軸間の距離；510mm）を基準長さとするレイノルズ数は $8.4 \times 10^5$ となる。

##### 4.1 結果

計測した乗用車モデル後流の平均総圧分布をグレースケールと等高線図として図10、11に示した。図中のグレースケールバーの数値は次式で定義される圧力係数 $C_p$ の値を示している。

$$C_p \equiv \frac{p - p_\infty}{(1/2)\rho U^2}$$

ここで、 $p$ はプローブによって計測された圧力値であり、 $p_\infty$ は一様流中の静圧値、 $\rho$ は空気密度、

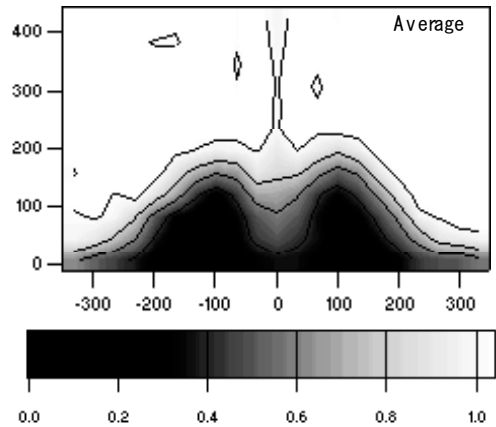


図10 ベルト ON での後流総圧分布

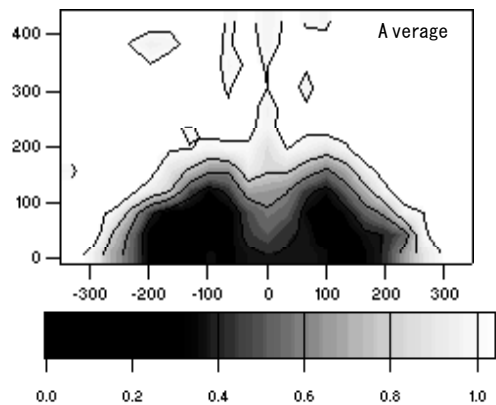


図11 ベルト OFF での後流総圧分布

そして、 $U$ は一様流の速度である。この式の分母は一様流中の動圧である。図の横軸はモデルの横方向の距離を、縦軸は高さ方向の距離をmm単位で表している。また、原点はモデル車幅方向の中心でベルト表面上である。計測はサンプリングタイム1.6msecで16,384回計測した。これら平均分布は16,384の瞬間分布を加算平均した。図10、11とも、左右に2つ圧力の低い領域が存在している。これは車両後流にできる一対の縦渦である。図10と11では、図の左右下角の分布が違っている。すなわち、図10では後流低圧部のすそ野が左右に伸びているが、図11では横軸中心から±300mmより外側では圧力係数は1となっている。これはムービングベルトがONおよびOFFの条件で、境界層の違いを示してい

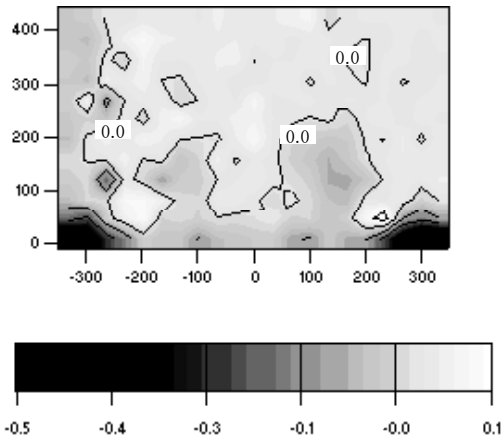


図 12 ベルト OFF と ON の総圧差の分布

る。また、これら 2つの等高線図の横軸中央付近の上方部に一様流より圧力が多少低い上下方向に長い領域が存在するが、これは車両モデルを固定したワイヤーの影響と思われる。

さらに、図 12 は図 10 の分布値から図 11 の分布値を引いた図である。上述のように、図の左右下角で、両条件での圧力係数値が大きく違っている。また、横軸 ±100 mm の地面付近で -0.1 以下の値をもつ。これらの箇所を除いて圧力係数値はゼロ付近の分布をしている。5 項ピトー管を用いたさらに詳しい後流計測の結果が山口他<sup>5)</sup>の論文に掲載されている。

5 車体表面圧力分布計測実験

車体表面の圧力分布がムービングベルト ON および OFF でどのように変わるかを調べた。実験モデルは上述のモデルと同じものを使用した。図 13 は原点を前輪車軸上の中点とし、車幅方向を X 軸、車長方向を Y 軸、鉛直方向を Z 軸とする座標系の OX 断面上のフード先端からトランクリッド後端までの表面圧力分布を示している。但し、X 軸はフロントビューで見て右側を、Y 軸は車両前方から後方を、Z 軸は鉛直上向きを正とする。図 13 の横軸はフード先端を 0 番とし、トランクリッド後端まで順に番号付けした計測点番号を示し、縦軸は圧力係数値を示している。グラフから明らかなように車体上面ではムービングベ

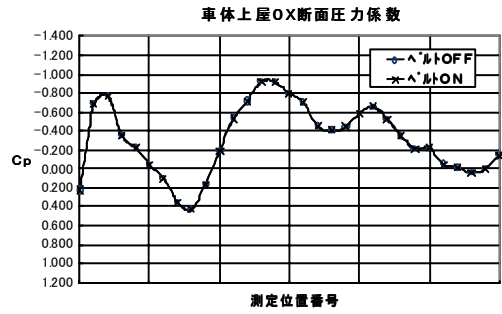


図 13 ボディ表面圧力分布

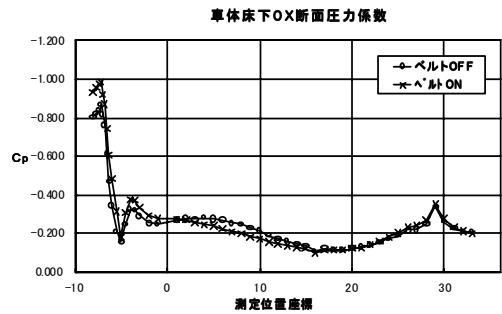


図 14 床下面圧力分布

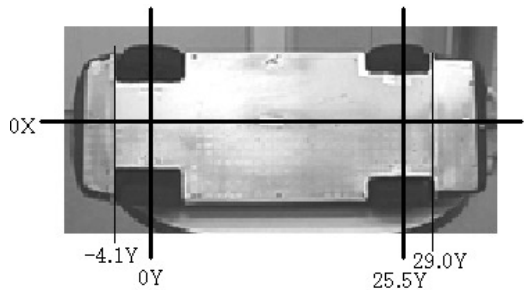


図 15 表面圧力計測モデル床下写真

ルト ON および OFF で、表面圧力分布に違いはほとんど見られなかった。図 14 は図 13 と同様に、上述した座標系の OX 断面における床下表面の圧力分布を示している。図 14 の横軸は実車寸法に換算した Y 軸を示し、縦軸は圧力係数値を示している。図 15 は計測したモデルの床下の写真である。-4.1Y から 29.0Y までの間はフラットであるが、-4.1Y と 29.0Y ライン上に折れ線があり、その角度は -4.1Y から車両前方には上方に 3.8°、29.0Y から車両後方には上方に 4.5°である。図 10 の計測結果を見ると、車体床下での

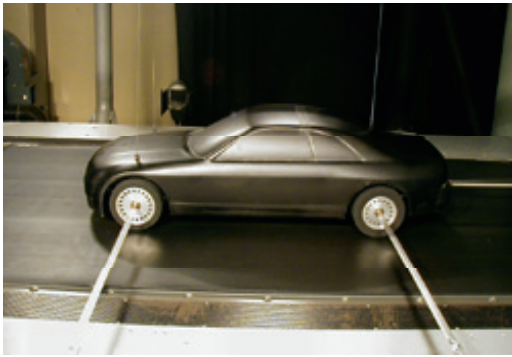


図 16 空力先行開発モデル写真



図 17 空力先行開発モデル床下写真

表面圧力分布では、フロントバンパ下端 (-8Y) から前輪車軸付近 (0Y) までは、ベルト ON のほうが OFF に比べて圧力係数値は低いが、前後車軸付近 (0Y) から車両の長さ方向の中央よりやや後方付近 (16Y) では、ベルト OFF のほうが ON より圧力係数が多少低い値を持ち、16Y から 24Y、また、28Y からリアバンパ下端まではベルト ON、OFF の差はほとんど無かった。24Y から 28Y で、再びベルト ON より OFF のほうがわずかではあるが低い値となっている。

図 16、17 は空力先行開発に用いた 1/5 スケールモデルの車体、および、床下の写真である。図 17 のように床下構造をある程度実車に忠実に再現してある。このモデルに空力的に効果のあるデバイスを付加した場合、ムービングベルトが ON と OFF とで、 $C_D$  が 0.02 (ON の方が大きい)、 $C_L$  が -0.05 (ON の方が小さい) 違う場合があった<sup>4)</sup>。

## 6 まとめ

以上のように、自動車における空気力学を概観し、ムービングベルトを作動させた場合と停止さ

せた場合とで、ベルト上の境界層計測、モデル後流の総圧分布計測、および、車体表面圧力計測の結果について述べた。この結果、以下のようなことが明らかになった。

- ・ムービングベルト OFF では、境界層が発達し、車両床下におよぼす影響が大きい。
- ・車両上屋表面圧力はムービングベルト ON および OFF の影響をあまり受けない。
- ・ムービングベルト ON の効果は床下に空力デバイスを付加した場合に揚力係数に顕著に表れる。

本文中でも述べたが、環境問題の高まりの中、 $C_D = 0.25$  付近の乗用車が市販されるようになってきた。自動車メーカ各社はさらなる低  $C_D$  車両の開発を押し進めると思われるが、各社、CFD 技術の設計活用度を上げる努力をしている。 $C_D$  が 0.2 を切る市販車の登場もそう遠くはないかもしれない。

## 引用文献

- 1) Wolf-Heinrich Hucho. : *Aerodynamics of Road Vehicles, Fourth Edition* (SAE Book, 1998).
- 2) 高木通俊他：モータースポーツにおける空気力学、日本航空宇宙学会、第 28 回年会講演会 (1997) 98-103.
- 3) Ogata, N., Iida, N. & Fujii, I. : Nissan's Low-Noise Full-Scale Wind Tunnel, SAE Paper 870250 (1987).
- 4) 石原裕二他：ムービングベルト風洞を用いた乗用車の空力開発、自動車技術会学術講演会前刷集 20015601 (2001).
- 5) 山口一郎他：ムービングベルト付風洞を用いた自動車模型の床下流れの研究、自動車技術会論文集 24 (1993) 65-70.
- 6) Ishihara, Y. & Takagi, M. : Unsteady Pressure Analysis of the Wake Flow behind a passenger car model, SAE Paper 1999-01-0810 (1999).
- 7) 石原裕二、高木通俊：乗用車モデル後流の非定常圧力計測、自動車技術会学術講演会前刷集 9933466 (1999).