高速車両底面の流れの制御による空力特性への影響* (流路壁による効果)

仲谷 仁 志^{*1}, 波多野 治 巳^{*2}

Effects on Aerodynamic Characteristics by Flow Control on Underside of High-Speed Road Vehicle (Effect of Channel by Skirts)

Hitoshi NAKATANI and Harumi HATANO

Channels by skirts are considered in order to style the underside of vehicles in such a way as to facilitate the air flow in relation to stability problems. The ground effect of these channels attached to the middle or/and rear of the vehicle underside is investigated in a wind tunnel with a moving belt and a suction box. Flow visualization of the underside is carried out using the methods of oil and tufts. As a result, these channels can control the flow underneath the underside of the vehicle, which has an important effect on the aerodynamic lift. The diffuser-type channel is effective in reduction of the lift. But effect to the drag are small. From flow patterns, the flow inside the channel on the middle is referred to the flow in a sudden enlargement or a contraction, and that on the rear to that in a diffuser.

Key Words: Aerodynamics, Aerodynamic Device, Road Vehicle, Flow Control by Channels, Ground Effect, Flow Visualization, Moving Belt

1. はじめに

自動車は、現在個別輸送機関として最も重要な交通手段の一つであり、道路の整備、エンジンの性能向上などにより、非常に高速度で走行できるようになってきた。それゆえ、自動車の空力特性の向上は無視できなくなっている。しかし、これまでの空力特性の研究は、燃料消費に関する抵抗低減⁽¹⁾が中心に行われ、車両形状に関しては角部が丸みをおびた低抵抗形状になってきている。このように省エネルギーに対しての車両形状についての研究は進んでいる。しかし一方、走行安定性に関する揚力についての研究は少なく、自動車の高速化に伴い、揚力低減の研究は、安全性の面からも重要である。

車両の揚力に関しては地面効果により、車両下部形状、すなわち、底面形状が最も大きく揚力に影響を及ぼす⁽²⁾が、現在のところ車両底面の改良に関してもまだ進んでいないのが現状である。それゆえ、本報では、車両底面の流れを簡単に制御する方法として、車両底

面と地面との間に流路を設け、これが空力特性にどのような影響を及ぼすかを風洞模型実験で調べる。風洞模型実験の場合、以前のように固定地面板を用いると、風洞床面の境界層が車両底面の流れに大きな影響を及ぼし、特に揚力測定には正確な値を示さない。そこで、本実験では、地面走行装置および境界層吸込装置を用いる。

つぎに、模型としては模型底面の流れを主に調べるため、回転状態のタイヤの存在は不可欠である⁽²⁾。それゆえ、実験はタイヤ回転状態で車両底面腹部、後部に走行方向に対して種々の流路を設け、風洞床面上の境界層を除いたうえで空気力(揚力、抗力)の測定を行う。さらに、模型底面に対して表面油膜法、模型底面と地面との間の流れに関してはタフト法により流れの可視化を行う。以上により、各底面形状の相違が空力特性、特に揚力に及ぼす影響を調べる。

2. 実験装置

2.1 風洞 図1に風洞の測定部の概略を示す。測定部の長さは2000mm、断面は高さ1000mm、幅1500mmの変形八角形で最大風速35m/sまで得られる。また、路面に相当する部分に地面走行ベルトが置かれ、空気の流速と路面との間の相対速度をなくす

* 原稿受付 平成3年9月17日。

^{*1} 正員、大阪府立大学工学部 (〒591 堺市百舌鳥梅町4-804)。

^{*2} 准員、(株)本田技術研究所 和光研究所 (〒351-01 和光市中央1-4-1)。

ことが可能である。さらに、測定部上流には、風洞床面で発達する境界層を吸引するサクションボックスが設置されており、文献(3)に示すように実際の走行状態により近い条件下で測定が可能である。なお、ベルトの速度は0~20 m/sの範囲で自由に調整できるようになっている。

2.2 実験模型 図2に実験模型の主要寸法を示す。模型はブロッケージ効果ができるだけ小さくなるように前面投影面積は小さくしてある。また、模型前面は、模型上面および底面への流れのはく離を防ぐため曲面に、模型後部には一定の傾斜角(9°)がつけてある。本報での流れを制御する流路は、模型底面腹部および後部に、スカート(流路壁)を装着することにより設けられる[図2(b), 3]。流路の広がり角は±3°間隔で、流路高さ h_s (図4)は5 mm間隔で変させることができる。なお、模型底面腹部および後部に流路のない模型を基本形状模型[図2(a)]と呼ぶ。

3. 実験方法

実験は、模型の全長を基準にしたレイノルズ数 $Re = 7.5 \times 10^5$ で行う。また、走行する地面に相当するベ

図1 風洞測定部概略図

(a) 基本形状模型

(b) スカート(流路壁)装着模型

図2 実験模型

ルトの速度は、このレイノルズ数のもとの風速(約20 m/s)に合せて実験を行う。

3.1 空気力の測定 模型を図4に示す最低部の地上高 $h=35$ mm(タイヤ接地状態)から $h=5$ mmまで5 mmごとに減少させ、揚力、抗力を測定する。さらに、模型底面腹部、後部に種々の広がり角を持つ流路を設け、それぞれの流路に対して揚力、抗力を測定する。なお、タイヤのベルト接触時の補正方法としては、無風の状態でタイヤがベルトに接触する前から h を減少させ、その分力を測定しタイヤの転がり抵抗などの影響を調べる。さらに、ベルトで誘起される風による空力成分を除くため、タイヤを浮上状態にし同じ測定を行う。補正值としては、タイヤが接触している場合のデータと浮上状態のデータとの差の平均値をとる。

3.2 流れの可視化 模型底面の流れを把握するため油膜法を用いる。油膜は軽油と二酸化チタン、オレイン酸の混合したものを用いる。また、模型底面の流れを三次元的に調べるため、タフト法を用いる⁽⁴⁾。タフトの長さは30 mmで、図4に示す模型底面腹部と後部の位置にそれぞれ長さ20 mm、直径0.7 mmの針の先とそれより10 mm上部の2箇所にタフトを取付ける。これらタフトの付いた針は模型の幅方向に10 mm間で17本並べられている。可視化は、空気力測定と同じレイノルズ数で行う。

なお、本報で用いられる各係数は模型の前面投影面積で無次元化する。

図3 模型底面図

図4 模型下部側面図

4. 実験結果

4.1 基本模型の空力特性 図5(a), (b)に最低地上高 h に対する揚力係数 C_L と抗力係数 C_D の変化をそれぞれ示す。

4.1.1 揚力係数 図5(a)より, h に対する C_L の変化は $h=35$ mm から $h=20$ mm にかけて減少, すなわち, ダウンフォースが増加しており, $h=20$ mm 付近で極小値をとっている. $h<20$ mm, 特に $h<15$ mm では, C_L は急に増加している。

4.1.2 抗力係数 図5(b)より, C_D は $h=20$ mm で極小値をとっているが h の変化に対して, ほとんど変化しない。

4.2 流路高さとの空力特性

4.2.1 模型底面腹部の場合 図6(a), (b)にそれぞれ $h=20$ mm (特に $h_s=20$ mm のときのみ $h=21$ mm) の場合に模型底面腹部に流路角 $\alpha_M=+9^\circ$ と -9° の流路を設けたときの h_s に対する C_L と C_D の変化を示す. 図6(a)の $\alpha_M=+9^\circ$ の流路の場合, h_s が大きくなるにつれて, C_L はかなり低減(ダウンフォースが増加)しており, C_D は C_L に比べ変化が少ない. また, 図6(b)の $\alpha_M=-9^\circ$ の流路の場合は, C_L に大きな変化が見られる。

4.2.2 模型後部の場合 図7(a), (b)にそれぞれ $h=20$ mm (特に $h_s=20$ mm のときのみ $h=21$ mm) の場合に模型底面後部に流路角 $\alpha_R=+9^\circ, -9^\circ$ の流路を設けたときの h_s に対する C_L と C_D の変化を示す. 図7より, $\alpha_R=+9^\circ$ の流路の場合, h_s が大きくなるにつれて, C_L は低減されるが, C_D には h_s の変

(a) 揚力係数 C_L

(b) 抗力係数 C_D

図5 基本形状模型の空力特性

(a) $\alpha_M=+9^\circ$ の場合

(b) $\alpha_M=-9^\circ$ の場合

図6 模型腹部の流路高さに対する空力特性

(a) $\alpha_R=+9^\circ$ の場合

(b) $\alpha_R=-9^\circ$ の場合

図7 模型後部の流路高さに対する空力特性

化に対してほとんど変化は見られない。また、 $\alpha_R = -9^\circ$ の流路の場合には、 h_s の変化に対して C_L および C_D に大きな変化は見られない。

図6, 7より、模型底面の流路は、 C_L に大きな影響を及ぼすが、 C_D には C_L ほど影響を及ぼさない。したがって、車両の走行安定性に影響を及ぼす C_L を考える場合、車両底面の流れが重要な要因である。それゆえ、以下揚力係数 C_L について考察する。

4.3 流路の広がり角と揚力係数

4.3.1 模型底面腹部の場合 図8(a), (b)に流路高さ $h_s = 20$ mm と 10 mm の場合で種々の h に対する腹部流路角 α_M と ΔC_L (基本形状模型の C_L に対する差)の変化を示す。図8より、流路の特性を以下の三つの領域に分けて考察する。

(1) $-15^\circ \leq \alpha_M \leq -3^\circ$ α_M が負で α_M を小さく、すなわち、流れに対して流路の絞込みの割合を大きくすると、基本形状模型の揚力より大きくなる。これは図9(a)の流れ模様より、腹部流路入口前後では流路断面が急に拡大するような流れに相当し、このため流れはここで大きく減速し、その後流路断面の漸次減少とともに流れは加速され圧力の降下は大きくなるが、

(a) $h_s = 20$ mm

(b) $h_s = 10$ mm

図8 模型腹部流路角と揚力係数

入口部での圧力上昇が揚力増加の原因と考えられる。さらに、図9(b)の α_M が小さく、流路壁下端と地面とのすきま ($h - h_s$) が大きい場合には、流路内から流路外への流れの一部流出が認められ流路内の流速は基本形状模型の流速まで回復しないと考えられる。このため $\Delta C_L > 0$ になり、このような流路では揚力低減は期待できない。

(2) $-3^\circ \leq \alpha_M \leq 3^\circ$ 図8(a), (b)より、この角度の範囲では ΔC_L は零付近である。これは基本形状模型の C_L と同じであることより、流れに平行な、あるいは少し角度を持った流路を設けても全体的な流れに影響を及ぼさないことがわかる。また一方、 $0^\circ < \alpha_M < 10^\circ$ のディフューザでは、流れが流路壁に沿って流れ、流れ方向の圧力変化も小さい⁽⁵⁾。したがって、本実験のこの範囲の広がり角を持つディフューザでは、流れが流路壁に沿って流れるため圧力変化も小さく、そのため基本形状模型の C_L からあまり変化しないと考えられる。

(3) $3^\circ \leq \alpha_M \leq 15^\circ$ α_M が正、流路を後ろに開いたとき、 α_M の増加に伴い、 ΔC_L は減少する。図9(c)の流れ模様より、流路入口のど部で激しい縮流が見られる。これは、模型前部の流れが流路入口で流れの断面の急な縮小のために生じたものと考えられる。これにより腹部流路入口では流れが、加速しその後断面積の増加とともに流れは減速するが、入口部での激しい縮流が揚力低減に大きな効果をもたらすものと考えら

(a) $\alpha_M = -9^\circ$, $h_s = 15$ mm, $h = 16$ mm

(b) $\alpha_M = -15^\circ$, $h_s = 20$ mm, $h = 25$ mm

(c) $\alpha_M = +9^\circ$, $h_s = 15$ mm, $h = 16$ mm

図9 模型腹部流路における流れ

れる。

図8(a), (b)より, h が小さくなるにしたがって ΔC_L の α_M に対する変化の割合は大きくなる。

どちらの h_s についても, α_M の増加に伴って ΔC_L は減少する。また, h_s が小さいほど流路の流れを支配する範囲が小さいため揚力係数への影響も小さくなると考えられる。

以上より, 腹部流路の流れと揚力との関係は, 水力学における流路入口部前後での流れの断面の急な拡大や急な縮小による流れの変化⁽⁵⁾ と対比して説明される。

4.3.2 模型底面後部の場合 図10に種々の h に対する後部流路角 α_R と ΔC_L の変化を示す。底面腹部に流路を設けたときは, 腹部流路角 α_M の増加にしたがい C_L は単調減少の傾向を示したが, この場合にはどの h に対しても測定範囲内の α_R に対して極小値を持つ。特に, h の小さい値においてこの傾向は顕著である。

(1) $-18^\circ \leq \alpha_R \leq -12^\circ$ この角度の範囲では $\Delta C_L > 0$ である。この場合, 流路の断面が漸次狭まるため流れは加速されるはずであるが, 図11の流れ模様より流路外側では模型側面やリアタイヤからの流れの流入によりこの部分の圧力が低くなる。この負圧により流路内の流れの一部は流路外に流出し, 流路内の流れは十分に加速されず, 流路中央部の圧力は上昇し, このために C_L が基本形状模型の C_L よりも大きくな

図10 模型後部流路角と揚力係数 ($h_s=20$ mm)

図11 (1)での模型後部における流れ ($\alpha_R = -18^\circ$, $h_s = 20$ mm, $h = 25$ mm)

ったと考えられる。

(2) $-12^\circ \leq \alpha_R \leq -6^\circ$ 図10より, h に対する3種の曲線が, 腹部の場合のように $\alpha_M = 0^\circ$ 付近でなく $\alpha_R = -9^\circ$ 付近の点で交わっている。これは, 模型後部底面が, 水平に対し傾斜角を持っているため流れは減速され, この減速度と流路の絞り度とが流路壁に沿った流れを作り出すものと考えられる。また, 図12(a)の基本形状模型の底面の流れと図12(b)の流れを比べると流れに変化がないことがわかる。

(3) $-6^\circ \leq \alpha_R \leq 18^\circ$ この角度の範囲では $\Delta C_L < 0$ である。すなわち, 基本形状模型よりもより大きなダウンフォースが生じている。図10より, $\alpha_R = +9^\circ$ までは揚力が減少傾向にあり, $\alpha_R = +9^\circ$ 付近で極小値を取り, $\alpha_R = +9^\circ$ 以上では揚力は増加傾向を示している。図13の $\alpha_R = +9^\circ$ の流れ模様では底面後部ガイド入口で, 腹部の大部分の流れをガイド内に引き込みガ

(a) 基本形状模型

(b) $\alpha_R = -9^\circ$, $h_s = 20$ mm

図12 (2)での模型後部における流れ ($h=25$ mm)

図13 (3)での模型後部における流れ ($\alpha_R = +9^\circ$, $h_s = 20$ mm, $h = 25$ mm)

図14 (4)での模型後部における流れ ($\alpha_R = +24^\circ$, $h_s = 20$ mm, $h = 25$ mm)

図 15 模型底面腹部および後部流路の影響
($\alpha_M = +9^\circ$, $h_s = 15$ mm)

イド部で速い流れとなっている。この速い流れによりガイド中央部の圧力は降下する。その後流路拡大部では断面積が漸次広がり、流れが後端にかけて減速され、圧力は漸次上昇するが、ガイド中央部の圧力の降下のほうが大きいために基本形状模型の C_L よりも小さくなったと考えられる。

(4) $18^\circ \leq \alpha_R \leq 24^\circ$ この角度の範囲では ΔC_L は(2)の場合とほぼ同じ値を取るが、(2)の場合の流れとは異なっている。図 14 より流路拡大部における流れが不安定な流れとなっている。すなわち、流路出口壁付近の右側に逆流が見られる。

以上より、揚力係数低減にはディフューザ形が有効である。そこで、本実験の範囲内での後部流路の流れとディフューザでの流れの領域⁽⁶⁾とを比較すると、特に、片壁のみ逆流がおこる(4)の場合の流路長さ、入口幅、広がり角ではディフューザ内における流れの状態と一致している。したがって、揚力係数低減に有効な後部流路はほぼディフューザ内の流れで近似できると考えられる。

4.4 底面腹部および底面後部に流路がある場合

図 15 に模型腹部に $\alpha_M = +9^\circ$ の流路を設けた場合で底面後部の流路の広がり角を変化させた場合の h に対する ΔC_L の値を示す。 C_L に大きく影響するのは腹部流路である。しかし、後部の流路の影響も表れており、底面腹部と後部の両方において揚力係数に改善の効果

のある流路を設けることで、その相乗効果により、単一の流路の場合以上に揚力係数が改善される。

5. 結 論

本論文では、模型車両に取付けられたタイヤは回転状態で、模型底面の流れを簡単に制御する方法として、模型底面腹部および後部に走行方向に対して種々の流路を設け、これら流路の相違が空力特性、特に揚力係数 C_L にいかなる影響を及ぼすかを調べ、以下の結論を得た。

(1) 車両底面腹部の流路の変化は C_L に最も大きな影響を及ぼし、正の広がり角を持つ流路（ディフューザ形）が、揚力低減に大きな効果があるが、負の広がり角を持つ流路の場合には効果がない。

(2) 車両後部に流路を設ける場合、 C_L を低減することは可能である。しかし、最適流路角度が存在する。また、この領域ではディフューザ内の流れが参考となる。

(3) 車両底面腹部と後部の両方において C_L に改善の効果のある流路を設けると単一の流路の場合以上に C_L が改善される。

(4) 車両底面腹部や後部またはその両方に設けられた流路は抗力係数 C_D に影響を及ぼさない。

以上より、車両底面の流れを制御することによって、揚力を有効に低減することが可能である。

終わりに本実験にご協力いただいた松村吉浩君に謝意を表す。

文 献

- (1) Hucho, W. H., *Aerodynamics of Road Vehicle*, (1987), 106, Cambridge.
- (2) 栗本・仲谷, 高速車両の形状変化に対する地面効果, 機論, 55-510, B(1989), 278.
- (3) 今安・仲谷, 高速大形車両におけるエアスポイラの効果, 機論, 53-485, B(1987), 163.
- (4) 流れの可視化学会編, 新版 流れの可視化ハンドブック, (1986), 92, 朝倉書店.
- (5) 宮井・ほか2名, 水力学, (1983), 108, 森北出版.
- (6) 妹尾, 内部流れと流体機械, (1986), 63, 養賢堂.