高速車両の形状変化に対する地面効果*

栗本 誠 治^{*1}, 仲谷 仁 志^{*2}Ground Effects for Various Body Configurations
of High Speed Road Vehicles

Seiji KURIMOTO and Hitoshi NAKATANI

Results are presented from an experimental study of lift, drag, pitching moment and flow field of a series of round-edged simple bodies of various angles of rake of front and rear underbodies. The bodies are proportioned similar to those of idealized road vehicles such as automobiles, vans and buses. Wind tunnel tests are performed by the running belt method, that is, boundary layer breather, moving road surface and rotating tires. The force coefficients and flow visualization studies indicate the importance of flow regimes characterized by trailing vortices which are determined by angle of rake of rear underbody and road clearance. The condition of tires is found to give significantly different lift and drag for road clearance of actual road vehicles. The effects of upperbody shape on ground effects are generally small.

Key Words: Aerodynamics, Ground Effects, Road Vehicles, Body Configurations, Angle of Rake of Underbodies, Rotating Tires, Running Belt Method, Flow Visualization

1. 緒 言

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、これまで空力特性での関心は、燃料消費に関係する自動車の空気抵抗⁽¹⁾に集中しており、走行安定性に関する揚力の研究はあまり行われていない。特に地面効果が大きく現れる床下の流れについては、従来の多くの研究のように固定された地面板を利用すると⁽²⁾、地面境界層のため車体の床下を通る流れが実際とは異なり、測定値に大きな影響を及ぼす。このため車体下部形状の影響については、地面走行装置が不可欠なこともあり、ほとんど調べられていない。

そこで本研究では、バス、トラック、乗用車など自動車全般に適用できるような模型を作製し、さらに模型の形状変化として、すでに模型底面後部の傾斜角を変えると抗力係数の値が改善されること⁽¹⁾などから、

まず模型の前後の底面の傾斜角を変化させ、空力特性にどのような効果を与えるか調べるものである。風洞実験は、境界層吸い込み装置と地面走行装置を用いた境界層制御を行って地面境界層の影響を少なくし、さらに模型のタイヤも回転させ、より実際の走行に近い状態で行う。また後流および模型表面の流れの可視化も行い、空気力の発生要因について考察する⁽³⁾。

2. 実験装置

2.1 風洞 本研究に用いる風洞の測定部の概略を図1に示す。風洞の測定部の長さは2000 mmあり、風速は約35 m/sまで上げることができる。測定部上流の風洞床面に境界層吸い込み装置が設置されており、風洞床面で発達した境界層を吸引している。また風洞測定部の床面に地面走行装置が設置されており、このベルトの回転により、地面境界層の影響のないほぼ均一な流速分布を得ることができる⁽⁴⁾。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おり、風洞の一樣流速度に合わせて実験が行われる。また、ベルト面は平均で約0.2 mm浮上しており、ベルト面の振動による3分力測定に対する影響は認められなかった。

2.2 実験模型 図2に実験模型の主要寸法を示

* 昭和63年10月29日 山梨地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年3月22日。

^{*1} 准員、本田技研工業(株) (〒107 東京都港区南青山2-1-1)。

^{*2} 正員、大阪府立大学工学部 (〒591 堺市百舌鳥梅町4-804)。

す。模型は、バス、トラック、乗用車など自動車全般に適用できるよう、各部の寸法は比例配分されている。したがってこの模型の上部に図2の一点鎖線で示されるような3 Box 形のパーツを取付けば乗用車に適用でき、1 Box 形のパーツを取付けばバスやバンなどに適用することができる。模型上部の形状は地面効果にそれほど大きな影響を及ぼさないと考えられるため、通常実験は模型上部を省略して行う。また模型上部形状の省略により、前面投影面積を小さくすることができ、ブロック効果による測定値の変化量を低く抑えることができる。模型は前後のオーバハング部分が交換可能となっており、前部底面角度 α_F 、後部底面角度 α_R を変化させることができる。またタイヤは、車軸がガイドに沿って自由に上下できるようになっているため、最低地上高 h (図1参照) が 33 mm 以下 ($h/l < 0.055$) で常に接地し回転するようになっている。さらに模型上部には、ノッチバック形状 (3 Box 形) の乗用車にするためのパーツや、バンあるいはワゴン (1 Box 形) の形状にするためのパーツも用意されており、それらを用いて模型上部の形状変化が地面効果にどのような影響を及ぼすかも調べることができる。そこで通常の実験を行う模型上部に何も取付けられていな

い状態の模型を、基本形状模型と呼ぶ。

3. 実験方法

3.1 模型の底面形状による空力特性の変化 模型前後の底面の角度を、図2に示すようにそれぞれ、0, 5, 10, 15, 20, 25°の6種類、合計36種類変化させ、各々の形状について静止状態での最低地上高 h を、2.5~200 mm ($h/l = 0.0042 \sim 0.33$) まで変化させ、約 20 m/s の一定流速で3分力の大きさを測定する。

3.2 模型の上部形状の影響 模型の上部に1 Box 形のパーツや3 Box 形のパーツを取付け、3.1節と同様に底面の形状と模型の最低地上高を変化させ3分力の大きさを測定し、3.1節の結果と比較検討する。

3.3 流れの可視化 流れの可視化は油膜法で行う。模型表面の流れは、軽油と二酸化チタン、オレイン酸の混合物を直接模型表面に塗布し、模型の後流は、模型後部の中心軸上に垂直に固定した鋼板にこれらの混合物を塗布し、空力特性の測定と同じ l を代表長さとするレイノルズ数 ($Re = 7.5 \times 10^6$) で可視化する。

なお、本報で用いられる各係数はタイヤの面積を除いた基本形状模型の前面投影面積で無次元化する。

図1 風洞測定部概略

図2 実験模型

4. 実験結果

4.1 模型の最低地上高に対する変化 本報では、地面効果が大きく現れる $h \leq 33$ の代表例として、 C_L が極小値を持つ前後の範囲で流れが大きく変わるの、この範囲での $h=15$ と $h=5$ を用いる。

4.1.1 基本形状模型

a. 揚力係数 C_L 図3(a)の実線は基本形状模型の最低地上高 h に対する C_L の変化を示したものである。模型の最低地上高を下げていくと、 h が 200 から 150 まで C_L は一定で h によって変化しない。このことから $h \geq 150$ では、地面効果はあまりないことがわかる。 h が 150 以下になると、 C_L は h の減少とともに減少する。これは模型が地面に近づくことによって模型の下側を通過する流れの流路が狭くなり、模型の下側を通る流れが増速するため、ベンチュリー効果によって下側の圧力が減少するためと考えられる。 C_L の減少の割合は h が小さくなるにつれて大きくなるが、 $h=60$ 付近で h の減少に伴う C_L の減少は止まり $h=33$ まで C_L は逆に増加する。この C_L の増加現象は模型底面からタイヤが出ているために起こるものである。

(a) 揚力係数 C_L (b) 抗力係数 C_D

図3 基本形状模型の空力特性

り、図4から次のように説明される。

図4は基本形状模型のタイヤを、標準、浮上、格納の3種類の状態にして h を変化させた場合の C_L の変化を示したものである。模型が地面から遠く離れている場合 ($h > 33$) には標準状態と浮上状態は全く同じ状態である。また格納状態とはタイヤのない模型を近似したものである。タイヤが標準状態にある場合と浮上状態にある場合には、 C_L の増加現象がみられるのに対し、格納状態にある場合には増加現象がみられない。したがってこの C_L の増加現象は、模型底面から出ているタイヤによって乱された流れが、地面と干渉するために起こると考えられる。また標準状態にある場合には $h \leq 33$ でタイヤが接地して回転しているのに対し、浮上状態にある場合にはタイヤは常に模型によって支持されており回転しない。このため $h \leq 33$ でこれら二つの場合の C_L の値が異なっている。 h がさらに小さくなるとタイヤはタイヤハウスの中に隠れていき、模型底面から出ている部分が減少してくるので最終的に3種類の場合の C_L は一致する。このように

図4 タイヤの状態による C_L の変化 (a) $h=15$ mm (b) $h=5$ mm

図5 模型底部の流れ

タイヤの状態が模型の空力特性に及ぼす影響は、実際の自動車が走行する最低地上高付近で最も大きい。このため地面効果を調べる場合に、回転状態のタイヤの存在は必要不可欠である。

次にタイヤが地面に接してからの変化は、以下ようになる。 C_L は $h=33$ から h の減少に伴って再び減少する。 h がさらに小さくなると、減少した C_L は $h=15$ 付近で極小値を持ち再び増加し始め、 $h=10$ 付近から急激に増加しているが、これは最低地上高が小さくなったために、ベルト面が模型底面の境界層の中に入ってしまう模型底部の流速が遅くなり、底部の圧力が上昇したためと考えられる。そのような状態になった流れが図5に見られる。図5(b)では模型底部の圧力が高くなっているため、底面前部で流れがまっ

すぐ後方へ流れず、模型の左右両外側へ逃げています。これにより揚力の増加の説明ができる。

b. 抗力係数 C_D 図3(b)に基本形状模型の最低地上高 h に対する C_D の変化を示す。 C_D は h の減少に伴い増加している。これはダウンスフォースの増加に伴う誘導抵抗の増加などによるものと思われる。 $h=33$ で C_D の増加は止まり、タイヤが接地する $h \leq 33$ では C_D は h の減少とともに減少する。この要因としては、 h の減少とともにタイヤがタイヤハウスの中に隠れ、タイヤの受ける空気抵抗が減少することや、模型底部からの流量が減少することにより後流の渦（特に下部の渦）が弱まることなどが考えられる。

4.1.2 模型の上部形状の影響 図3(a), (b)の△印と□印は、基本形状模型の上部形状を変化させた

図6 模型前後の形状変化に対する空力特性

ときの C_L , C_D の変化を示す。△印は模型上部に3 Box 形状のパーツを取付けた場合を、□印は1 Box 形状のパーツを取付けた場合の変化を示す。これらの図より1 Box 形状, 3 Box 形状ともに h に対する C_L , C_D は、基本形状の C_L , C_D と一定の差（この差は模型の形状変化によって生まれたものである）があるだけで、変化の傾向はほぼ同じであり、実線で示した曲線を平行移動した形になっている。また、各場合に $h=200$ との差をとれば地面効果による変化量と考えることができるが、それぞれの地面効果による変化量もほぼ等しい。このことから C_L および C_D に関して、模型上部の形状の変化は模型の受ける地面効果にあまり影

響を及ぼさず、地面効果を調べるには模型下部の形状のみを考えれば定性的な傾向がわかる。

4.2 模型前後の形状変化に対する空力特性 図6(a-1)~(a-3)にそれぞれ $h=200, 15, 5$ の場合の α_F , α_R に対する C_L の変化を示す。また同様に図6(b-1)~(b-3)には C_D の変化を示す。 $h=200$ の場合には車体が地面から離れているため地面効果は小さく、どの α_R の場合でも C_L は α_F に対してほぼ一定でほとんど変化しない。また α_R の増加に対して C_L はほぼ直線的に減少しており、この地上高では C_L はキャンバラインの変化のみによって決定されている。 C_D に関しては α_F の増加に対してほぼ一定の割合で増加し、 α_R に対しては $\alpha_R=10$ までわずかながら減少し、 $\alpha_R>10$ では α_R の増加とともに増加している。この様な C_D の変化の様子は、ハッチバック車のリヤウインドウの傾斜角に対する C_D の変化の傾向と一致している⁽²⁾。これらの傾向は $h=100$ 付近まで続き、この範囲では地面効果が小さいことを示している。また可視化による流れの観察でも、模型周辺の流れはこの範囲の h に対してほとんど変化しない。

ところが $h=15$ になると地面効果が大きくなりはじめ、 α_F に対する C_L は一定ではなくなり、 α_F の増加に対して C_L は増加するようになる。この C_L の増加現象は模型前面からはく離れた流れが、模型側部に渦を形成するために起こる。またこの渦のため α_F の増加に対する C_D の増加量も大きくなる。模型側面での流れの変化の様子を図7に示す。それぞれに対する変化は単調に増加するのではなく、双方ともに角度が 20° 以上になると C_L はあまり変化せず一定になる。

$h=5$ になるとその傾向はさらに強まり、 α_R は 15° 付近で C_L は極値を持つようになる。これは可視化の結果の図8から以下のように説明される。(a)の $\alpha_R=$

図7 模型側部の流れ ($h=5$ mm, $\alpha_F=0^\circ$)

図8 模型底部の流れ ($h=5$ mm, $\alpha_F=0^\circ$)

図9 模型後流 ($h=5$ mm, $\alpha_F=0^\circ$)

図 10 前後の形状変化による流れ ($h=5\text{ mm}$)

0では模型後部の流れがまっすぐ後方に流れているのに対し、(b)の $\alpha_R=5$ では後部の流れが縮流しその左右両側に渦が形成されている。(c)の $\alpha_R=15$ になるとその渦がさらに強くなっている。この渦により模型底部の圧力が低くなり、大きなダウンフォースが生まれるのである。またこのときの後流には強いらせん形渦により上向きになった流れが図9に見られる。このらせん形渦のため空気抵抗も大きくなる。ところが(d)の $\alpha_R=25$ では底面後部の流れが流路の急拡大についていけずはく離しており、渦の中心付近以外の部分はよどんだ状態になっている。そのためこの部分の圧力が高くなり、ダウンフォースが小さくなる。また空気抵抗も減少する。

以上のように本実験の範囲では、 C_L の変化の様子は h によって異なるが、前後どちらかの角度を固定した場合に、もう一方の角度の変化に対する C_L の変化はどの場合でも各変化の線がほぼ平行移動した状態に並んでいる。このことは h が一定の時、前後の角度の変化に対する C_L の変化はほぼ独立であることを示している。また図10から模型前部の流れは α_F によって定まり、後部の流れは α_R によってほぼ定まっており、互いに流れに干渉していないことがわかる。そのため、 α_F と α_R の両方の効果は、 $\alpha_R=0$ の時の α_F による C_L の変化と $\alpha_F=0$ の時の α_R による C_L の変化から、各々による変化量を加えることにより近似できる。ま

た C_D についても同様のことがいえる。

5. 結 言

本研究では車体下部の形状変化に対して地面効果の違いにより、車体に作用する空気力がどのように変化するかを調べた。その結果以下のようなことがわかった。

(1) 車体後部の底面角度に対する空力特性の変化は、最低地上高の高いときには地面効果が小さいため、リヤウインドウの傾斜角に対する空力特性と同様の結果になる。ただし揚力に関してはその絶対値が逆になる。

しかし最低地上高 h の低いときには地面効果により、これらの傾向が逆になることがある。これらの結果は模型後縁ではなく離れの形態と、後流で形成される渦によってもたらされ、この流れの状態は模型後部の底面角度と最低地上高によって決まる。

(2) 車体前部の底面の角度を増加させるとわずかながら揚力、空気抵抗とも増加する。最低地上高が低くなるとそれらの増加量も大きくなる。これは模型側部に渦が形成されるため、この渦は前部底面角度の増加と最低地上高の減少により成長する。

(3) 車体前後の形状変化は互いの流れにほとんど影響を及ぼし合わない。したがってこれら双方の効果はほぼ独立でありそれぞれの効果を加え合わせることで、双方の効果を近似することができる。

(4) 車体上部の形状変化は車体の受ける地面効果にあまり影響を及ぼさない。したがって車体下部の形状が同じであれば地面効果による空力特性の変化量はほぼ等しい。ゆえに地面効果による空力特性の変化を調べるには、車体下部の形状のみを考えればよい。

(5) タイヤの状態が模型の受ける地面効果に及ぼす影響は、実際の自動車が走行する最低地上高付近で最も大きい。このため地面効果を調べる場合に、回転状態のタイヤの存在は必要不可欠である。

文 献

- (1) Hucho, W. H., *Aerodynamics of Road Vehicles*, (1987), 106, Cambridge.
- (2) 例えば, Ahmed, S. R., *Influence of Base Slant on the Wake Structure and Drag of Road Vehicles*, (1983), 429, *Journal of Fluids Engineering*.
- (3) 流れの可視化学会編, 新版 流れの可視化ハンドブック, (昭61), 92 朝倉書店.
- (4) 今安・仲谷, 高速大型車両におけるエアスポイラの効果, 機論, 53-485, B (昭62), 163.