

ボルテックスジェネレーターによる空気抵抗低減の研究

Research on Aerodynamic Drag Reduction by Vortex Generator

小池 勝* 永吉 恒久* 濱本 直樹*
Masaru Koike Tsunehisa Nagayoshi Naoki Hamamoto

概 要

セダンタイプの乗用車ではルーフ後端付近で気流が剥離して、空気抵抗の主要な要因の1つになっている。この剥離を遅らせる（下流側にもっていく）ためにルーフ後端付近に突起状のボルテックスジェネレーターの適用を試行した。ボルテックスジェネレーターは従来から航空機に剥離防止などのために応用されている。ボルテックスジェネレーターはそれ自体が空気抵抗の源となるが、それにより下流側の剥離を防止して抵抗を低減させる効果も有し、その合計が効果となる。したがってその形状やサイズには最適値が存在する。本論文では、車のルーフに装着した場合の最適値を探るための試験結果と、それが流れ場に及ぼす影響とメカニズムについて調査した結果を報告する。

Abstract

One of the main causes of aerodynamic drag for sedan vehicle is the separation of flow near the vehicle's rear end. To delay flow separation, bump-shaped vortex generators are tested for application to the roof end of a sedan. Commonly used on aircraft to prevent flow separation, vortex generators themselves create drag, but they also reduce drag by preventing flow separation at downstream. The overall effect of vortex generators can be calculated by totaling the positive and negative effects. Since this effect depends on the shape and size of vortex generators, those on the vehicle roof are optimized. This paper presents the optimization result, the effect of vortex generators in the flow field and the mechanism by which these effects take place.

Key words: Body, Aerodynamics, Aerodynamic Devices, Flow Visualization, Computational Fluid Dynamics (CFD)

1. ま え が き

省エネルギーや地球環境保護のために、自動車の燃費低減は開発における最重要課題の1つとなっている。燃費や走行性能向上のために空気抵抗の低減は大きな要素であることは当然であるが、空力的に洗練されたボデーのデザイン自体も重要な商品力の1つと考えられる。

しかし自動車では乗員、荷物、エンジンなどをコンパクトにパッケージする必要があるため、車体形状を空力的に最適化するのは一般的に困難である。そのため車は魚や鳥のような流線型にはできなくて、流体力学的にはいわゆる鈍い物体、つまり気流が後部で剥離する形状になるのは避けられない。しかし一概に鈍い物体と言っても、立方体のように C_D 値が1.0を超えるものから、砲弾のように0.1以下のものまで多様であり、乗用車ではおよそ0.2と0.5の間に分布しているのが現状である。鈍い物体において、 C_D 値に影響する主要な要素は前部のコー

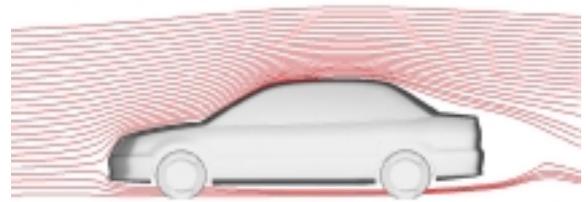


図1 セダンの車体周りの気流
Flow around a sedan

ナーの丸みと後部の絞り込みである。前部のコーナーの重要性は言うまでもないが、後部の絞り込みの重要性は乗用車について述べると以下のようなになる。

図1はセダンタイプでの車体周りの流れを概観したものであるが、トランクが存在するためにルーフ後端付近で剥離した気流は下方に広がり、全体として後部を絞り込んだ流線型での流れに近づいている。そのため一般にワゴンタイプよりトランクを有したセダンタイプの方が C_D 値が小さい傾向にある。このように後部の絞り込みは剥離を遅らせる（下流側にもっていく）効果があ

* 開発本部 スタジオ・パッケージング技術部

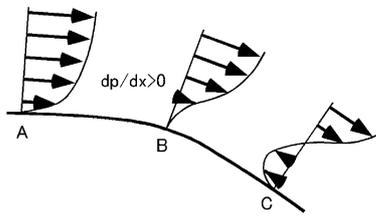


図2 ルーフ後端付近の速度分布概略
Schematics of velocity profile around rear end

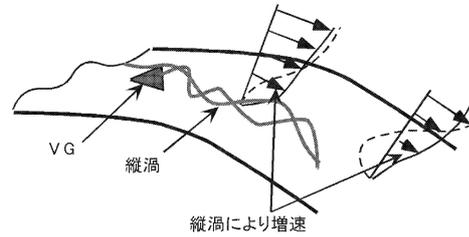


図3 ボルテックスジェネレーターのねらい
Schematics of flow around vortex generator

る。
さらに効果を高める手段としてよく知られているものにゴルフボールのディンプル（凹み）がある⁽¹⁾。ディンプルを装着することにより C_D 値は数分の1まで減少する。これは、ディンプルによって、境界層流れが層流から乱流に遷移するレイノルズ数（クリティカルレイノルズ数と呼ばれる）に変化が生ずるためである。また、航空機の主翼などでは、クリティカルレイノルズ数を超えた場合でもボルテックスジェネレーター（以下、VGとする）により、境界層を積極的に制御している例がある⁽²⁾。

本研究で検討するVGは、セダントタイプの車のルーフ後端付近での気流の剥離を抑えることを目的としているが、ねらいは航空機の場合と類似しているため、形状については航空機のを参考にした⁽²⁾。

2. 剥離のメカニズムとボルテックスジェネレーターのねらい

車のルーフ後端からリヤウィンドウにかけての車両中央断面付近の流れを図2に模式的に示す。この付近は下流に行くにつれて車高が低下しているため拡大流れが形成される。このため下流側の圧力が高くなり、気流には主流と逆向きの力が加わるため、下流側の点Cでは逆流が発生する。しかし上流側の点Aでは圧力勾配 (dp/dx) に対して境界層の運動量の方が優勢であるため逆流は発生しない。そして、圧力勾配と境界層の運動量が均衡したAとCの間が、剥離点Bとなる。図2に示すように、境界層内の壁面に近い下層では、空気粘性のため下流側に行くにしたがい気流は急速に運動量を失う。そこで図3に示すように剥離直前で縦渦を形成して、運動量の大きい上層から運動量の小さい下層に運動量を補給しようというのがVGのねらいである。それによって剥離点を下流側に移動させることができる。剥離点が下流側に移動すると拡大流れがそれだけ下流まで持続されるため、剥離点での流速が遅くなり、その結果静圧が上昇する。剥離点の静圧は剥離域全体の圧力に影響し、背圧を上昇させて抵抗が減少する。つまり剥離点を下流側に移動させることは、抵抗の原因になっている圧力の低い剥離域を縮小させるだけでなく、剥離域の圧力を上昇させるという2つの効果があり、車体の抵抗を低減させ

るのである。
しかし縦渦を形成するために設置するデバイス、すなわちVGはそれ自体が抵抗を伴う。したがってVGの効果は、前述の剥離点を下流に移動させる効果から、VG自体の抵抗を差し引いたものになる。VGを大きくすると両者とも大きくなるが、剥離点を移動させる効果はあるところで限界に達するので、最適なVGの大きさが存在すると考えられる。

3. 実験方法

VGの効果及び最適化の検討は当社の実車風洞⁽³⁾を用いて行った。計測部は密閉型で、主流風速は50 m/sとした。供試車両は当社のランサーエボリューションを用いた。車両全体の6分力を計測することによってVGの効果調べ、さらに最適な形状やサイズを検討した。またVGの効果の要因を明らかにするため、楯形総圧管を用いた後流の総圧分布計測、PIV (Particle Imaging Velocimetry) を用いた流れ場計測及びCFDによる流れ場の詳細検討を行った。

4. 最適なVGの検討

前述したねらいを達成するためには、VGの形状としてはできるだけ効率的に（抵抗が小さく）縦渦を発生させるものを選定し、なおかつサイズを最適化する必要があると考えた。

まずサイズについて、最適な高さは境界層厚さ程度であると考え、そのため境界層の厚さを計測した。図4にセダンのルーフ上の速度分布を示す。VGの装着が想定される剥離点直前のルーフ後端部では、境界層厚さは約30 mmであることが分かる。したがってVGの高さは約30 mm以内が最適であると推測される。

次に効率的な形状については、ハッチバック形態の乗用車において、リヤウィンドウ傾斜角が25 ~ 30°の場合に強い縦渦が形成されることが知られていること⁽⁴⁾から、その程度の後面傾斜角を有するコブ状の突起が効率的と考えられる。あるいはデルタ翼をもつ航空機では前縁から強い縦渦が発生することから、ハーフスパンのデルタ翼形状も推奨されている⁽²⁾。

VGの位置は剥離点のすぐ上流が最適と考え、図5に

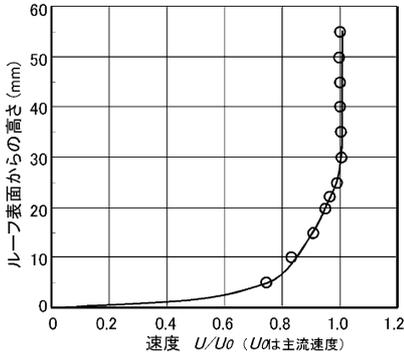


図4 ルーフ上の速度分布（後端から100 mm 上流）
Velocity profile on roof (100 mm upstream from rear end)

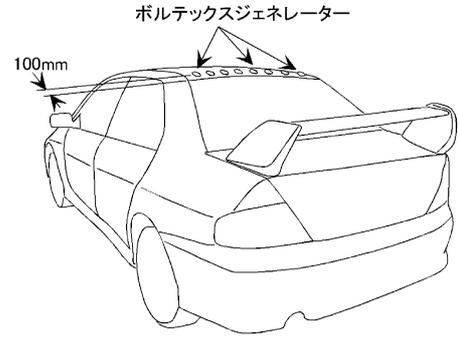


図5 ボルテックスジェネレーターの装着位置
Location of vortex generators

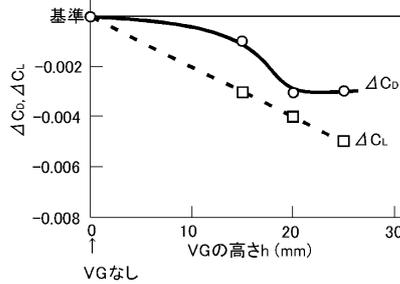
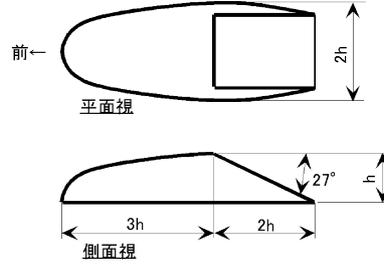


図6 コブ状のボルテックスジェネレーターの効果
Effects of bump-shaped vortex generators



示すようにルーフ後端から前100 mmの位置とした．ここに先述したコブ状のVGを装着した場合の効果を図6に示す．コブの形状は図に示すように前半は抵抗を最小にするため滑らかな形状とし、後半は縦渦が発生するように約27°の傾斜で切り落とした．図6に示すように高さを15, 20, 25 mmと変化させ、形状は相似とした．図6のグラフから分かるように高さ20～25 mmで C_D 値は最小となり、その付近の高さが最適であることが分かる．ただし揚力はVGをさらに高くすると減少すると推定される．このように高さに対して C_D 値の変化が比較的小さい理由は、先述したようにVGを高くするにしたがい、剥離点の後退による抵抗の低減とVG自体の抵抗の増加が同時に起こり、高さ20～25 mmでは両者の変化が同程度であるためと考えられる．

以上からコブ状のVGは形状、サイズを最適化した場合、 C_D 値で-0.003程度の効果を出すことができた．

次にデルタ翼形状のVGの検討結果を示す．推奨されている形状⁽²⁾は下記のようなものである．

- 長さ / 高さ = 2
- ヨ－角 = 15°
- 設置間隔 / 高さ = 6

これを参考にして供試したデルタ翼は

- 長さ / 高さ = 2
- 高さ = 15, 20, 25 mmの3種
- 厚さ = 5 mm

ヨ－角については気流に対してデルタ翼を15°に設置する必要があるため、ルーフ後端の風向をオイルフローにより調査した．風向は左右位置によって異なり、車体中心部では真後ろに向いているが、外側にいくにしたがい中心部に向くように徐々に変化していることが分かった．したがって中心部ではデルタ翼は車体の中心線に対して15°、最も外側ではほぼ0°となった．試験結果を図7に示す．高さ変化に対してはコブ状のものより鈍感で、15, 20, 25 mmのいずれの場合も C_D 低減効果は-0.006であった．揚力係数に対しては高さが高い方が低減効果がわずかに大きい．またVGの数や位置を多少変更しても C_D 低減効果はほとんど変わらないため、ここで試験した範囲が最適であると考えられる．

以上からデルタ翼形状のVGは C_D 値で-0.006程度の効果を出すことができたことが分かった．

コブ状よりもデルタ翼形状のVGの方が効果が大きい原因を推定すると、デルタ翼の方が前面投影面積が小さいためそれ自体の抵抗が小さく、またデルタ翼は板状になっているため、エッジで発生した渦がその後流で物体と干渉し難いため渦の強さが保持される．一方コブ状のVGではコブの後流側エッジで発生した渦はコブに近い

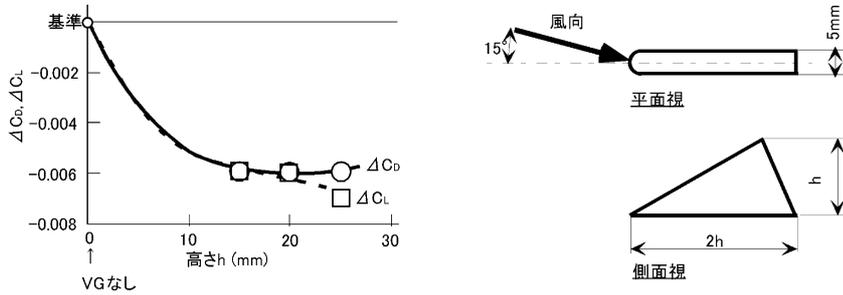


図7 デルタ翼形状のボルテックスジェネレーターの効果
Effects of delta-wing-shaped vortex generators

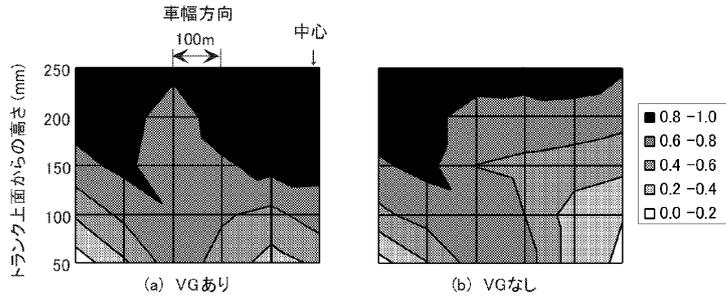


図8 総圧分布計測結果（リアスポイラ前方）
Total pressure distribution (upstream of rear spoiler)

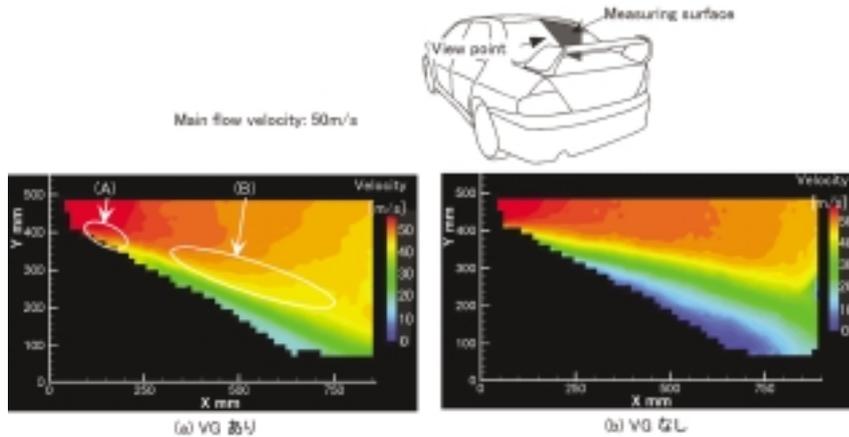


図9 PIVによる速度分布の計測結果
Velocity distribution by PIV measurement

位置にあるため干渉し、渦の強さが弱まるものと推定される。

5. VGのメカニズムの検証

2項でVGの効果は剥離点が下流側に移動し、剥離領域が縮小するためと推定したが、それを検証するため、流れ場を調査した。

図8にVGの後流，リアスポイラーの直前の総圧分布を計測し，VGありとなしで比較した結果を示す．総圧の高い領域が流速の速い領域であり，VGの装着によって高速の領域が下方に広がっている．すなわち剥離域が縮小していることが分かる．

図9はPIVにより速度分布を計測した結果である．PIV用のレーザーライトシートは車体中心面に上方から照射し，図中のMeasuring surfaceを側方（図中のView point）から撮影し，二次元の速度分布を算出した．VGありの場合の速度分布を図9(a)に，VGなしの場合を図9(b)に示す．これらの図からVGなしに比べてありではVGの直後で物体（リアウィンドウ）表面の速度が増加しており（図中(A)），さらに速度の速い領域が下方に拡大していること（図中(B)）が明らかに見取れる．このことは，前節で述べたリアウィンドウ上の気流をVGによって物体表面に付着させるという推定を裏付けるものである．

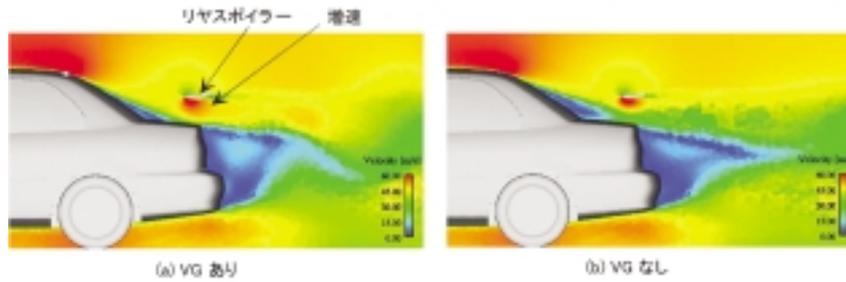


図10 CFDによる速度分布の計算結果
Velocity distribution by CFD

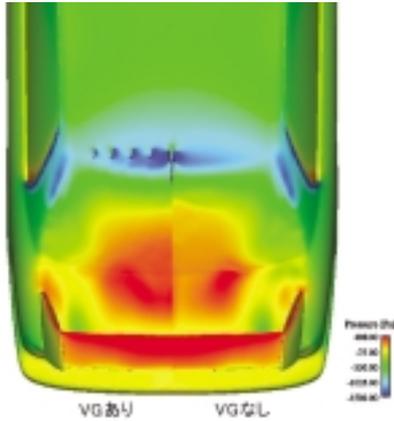


図11 車体表面圧力分布 (CFD)
Pressure distribution of vehicle (CFD)

現象をさらに詳細に調査するためCFDを適用した。ソルバーはStar-CD、乱流モデルはRNG k-εモデルを用いた。また、リヤウィンドウでの流れの剥離を捉えるために、車体近傍にはプリズムセルを挿入し、剥離点付近での y^+ が20～50程度の適切な値となるよう計算格子を作成した。計算結果をVG有無で比較して図10に示す。計算結果はPIVによる計測結果とよく一致し、速度の遅い領域が縮小していることが分かる。またCFDによる抵抗と揚力の変化は下記のようになり、実験結果(図7)とおおむね一致した。

$$\Delta C_D = -0.004$$

$$\Delta C_L = -0.013$$

以上から計算結果は実際の現象をほぼ再現していると考えられる。CFDによる図10の流れ場からさらに分かることは、リヤスポイラーの下面の速度がVGを装着することによって増加していることである。このことは、揚力が減少している(ダウンフォースが増加)ことを裏付けている。また、トランク後部の剥離域(速度の遅い領域)が若干縮小していることも分かる。

また、図11に車体表面上での圧力分布を示す。VGを装着することにより、リヤウィンドウからトランク上面の広い領域で表面圧力が上昇し、これが抵抗を低減させ

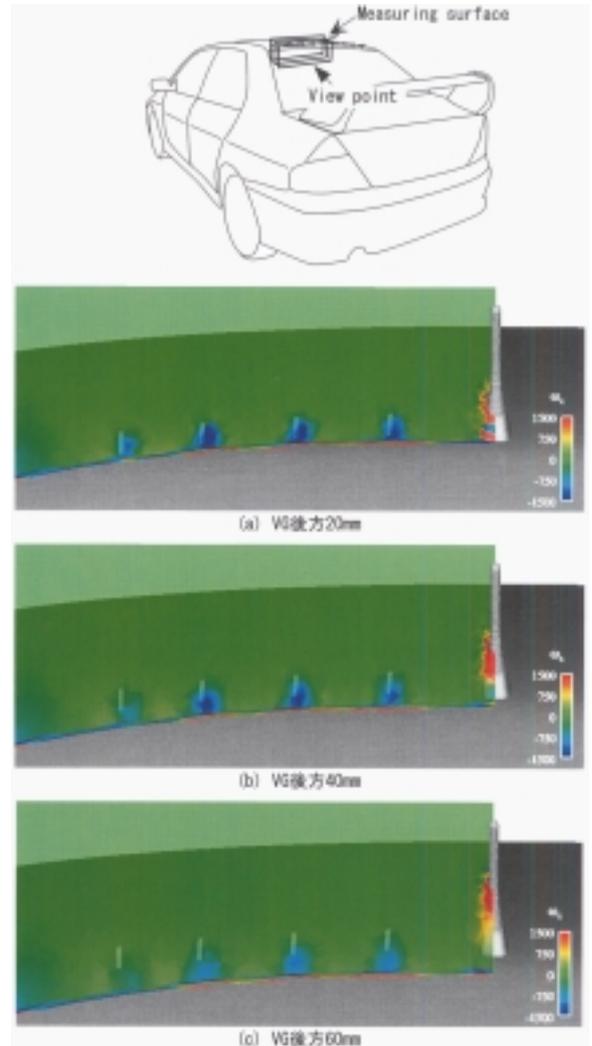


図12 VG後方における渦度分布 (CFD)
Vorticity distribution behind vortex generators (CFD)

ている。ただしVG周辺での負圧は強くなり、VG自体は抵抗になっている。

上記のVGによる流れの変化は、流れがリヤウィンドウから剥離し難くなるためと考えられるが、そのメカニズムを検証するために、さらに詳細に流れを見る。図12はVG後方での渦度分布を示す。VGによりその後方で縦渦が形成されていることが分かる。

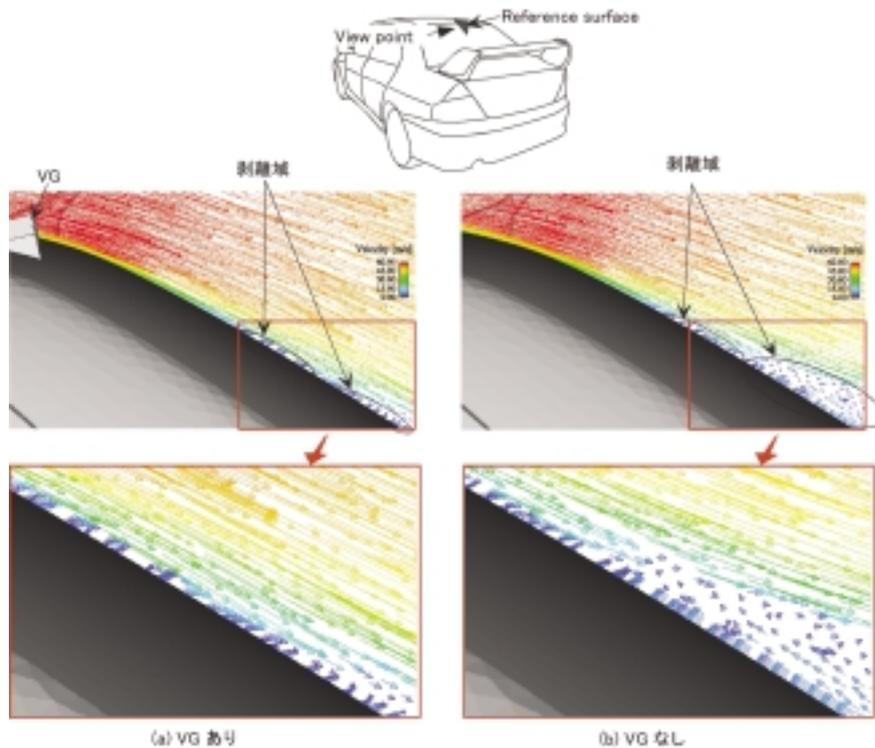


図 13 剥離点付近の流れ (CFD)
Velocity vectors around separation point (CFD)

この縦渦によって剥離点が下流側に移動すると推定したが、次にそれをCFD結果で詳細に確認する。図13は剥離点付近の流れ場をクローズアップしたものである。VGがある場合の方が、流れの剥離は、より下流から始まっていることが分かる。

6. あとがき

本研究の結論をまとめると以下ようになる。

- (1) セダン車のリヤウィンドウ上を過ぎる気流の剥離を制御し空力特性を改善するために、ボルテックスジェネレーター（VG）を剥離点の直上流に応用することを検討した。その結果、高さは境界層厚さ程度（15～25mm）、ルーフ後端から100mm上流側に横1列に並べ、間隔は100mm程度が最適であることが分かった。ただしそれらのパラメーターはあまり敏感ではなく、最適値の幅はかなり広い。形状についてはコブ形状よりもデルタ翼形状の方が、効果が大きかった。
- (2) 上記で得られた最適形状のVGをランサーに適用すると空気抵抗係数、揚力係数ともに0.006の低減効果が得られた。
- (3) VGの効果の要因を総圧分布、速度分布の計測、CFDで確認した結果、VGによって縦渦が形成され、境界層の上層と下層の気流がミキシングされることにより剥離点が下流側に移動して、剥離域

が縮小することが分かった。その結果、車体後部全体の圧力が上昇し抵抗が低減すること、リヤスポイラー周辺の速度が増加し、揚力が低減することが推定できた。

なお、本研究で顕著な効果が見出されたデルタ翼形状のVGは、デザイン、法規要件、実用性などを考慮して若干の形状変更を加えた上でセダン向けの用品として製品化する予定である。

参考文献

- (1) Hoerner, S. F., Fluid-dynamic Drag, Published by the Author, 1958
- (2) Hoerner, S. F., Fluid-dynamic Lift, Published by the Author, 1985
- (3) 柴田寿一、三菱自工の風洞、自動車研究 Vol. 5, No. 9, 1983
- (4) Hucho, W. H. Aerodynamics of Road Vehicles Fourth Edition SAE International 1998



小池 勝



永吉恒久



濱本直樹