自動車近接走行時の空力特性に及ぼす横風の影響*

青山 一樹^{*1}

The Effects of Crosswind on the Aerodynamics of Vehicles Running in Close Proximity

Kazuki AOYAMA^{*1}^{*1} Osaka Sangyo University

3-1-1 Nakagaito Daito Osaka, 574-8530 Japan

This paper deals with the aerodynamic interference between two vehicles which are running in close proximity and are subjected to crosswind. Measurements of the aerodynamic drag, side force and yawing moment were performed at different wind angles and longitudinal and lateral distances between two vehicles. In crosswind, extreme proximity between the vehicles ahead and behind provides several peaks of aerodynamic drag, side force and yawing moment acting on the vehicles. When one vehicle passes the other one in crosswind, the large variation in these forces and moment leads to the danger of driving. Numerical results by the CFD show a good agreement with experimental ones. They reveal that the aerodynamic drag is influenced by airflow behind the other vehicle, and that the side force and the yawing moment are also influenced by complicated airflow structure due to the aerodynamic interference between two vehicles.

Key Words : Automobile, Fluid Dynamics, Computational Fluid Dynamics, Wind Tunnel, Traffic Environment

1. 緒 言

自動車の走行において、周辺環境（自然風や他車の影響など）により受ける空力特性の変化は、操縦安定性に影響を及ぼし、運転時の不安定要素となる。近年の自動車は、ASV（先進安全自動車）技術の実用化が進んでいる。その技術の一つである ACC（アダプティブ・クルーズ・コントロール）搭載車両が高速道路において他車を追い抜く際、本研究のような二台の車両の速度差が少ない状態での追い抜き状況が増加するものと予測される。また、日本の高速道路ではトンネルや切り通しが多いため、車両は横風を受けやすく、車両の走行が不安定になり非常に危険である。したがって、横風をうける近接走行時の空力特性の解明は重要である。しかし、横風を受けない複数車両の近接走行時の空力特性に関する研究^{(1),(2)}はよく知られているが、横風の影響を考慮した複数車両走行時の空力特性の研究は数少ない^{(3)~(5)}。また、風を受ける建造物まわりの流れについても多く行われている。たとえば、柱体群まわりの流れの研究^{(6),(7)}などがあるが、構造物本体の振動などを考慮するなど、本研究のような自動車走行時の扱いとは大きく異なる。

本研究は、横風を受けた状態で、近接し平行走行している二台の車両のうち、後続車両が先行している車両を追い抜く状態を想定した。風洞実験では、風向きと非測定車の位置を変化させて測定車に働く抗力、横力およびヨーイングモーメントを測定した。さらに、実験結果を詳細に考察するために、CFD（数値流体解析）によって、横風状態における近接走行時の空力特性の解明を試みた。

その結果、追い抜き始めと追い抜き終わりにおいて空力特性に変動がみられるとともに、風向きによってその変動に大きな違いが現れることがわかった。これらを詳しく解析することによって、空力特性の車両操縦安定性、すなわち、運転の安定性への影響が解明できた。

* 原稿受付 2010 年 11 月 17 日

^{*1} 正員、大阪産業大学（〒574-8530 大阪府大東市中垣内 3-1-1）

E-mail: aoyama@ojc.osaka-sandai.ac.jp

2. 実験装置および方法

図1は実験に使用した回流式風洞を示す。測定部は開放式で、高さ1m、幅1m、長さ2mであり、風速の最大速度は45m/sである。風洞測定部の前にはメッシュの整流板を設けて、一様流にしている。実験には、縮尺1/12のワンボックス型自動車模型を使用した。模型の寸法は全長256mm、幅112mm、高さ112mmである。なお、模型の前面部（前面と側面、前面と屋根）の角は半径10mm程度の丸みをつけている。

実験は同一形状の自動車模型を二台用い、六分力天秤に取り付けた模型を測定車、もう一台を非測定車とし、測定車が非測定車を追い抜く状態を想定して行った。図1の上部に二台の自動車模型を配置した地面板を示す。

模型は四隅を棒状のステーで約20mm地面板から離して固定している。横風を受ける状態は、風洞に対して地面板の取り付け角度を変えることで設定した。なお、地面板の端部の底面側はくさび状の面取りを施し、乱流境界層の発生を抑えている。

図2に模型の配置を示す。水平面上における測定車（白色）の中心を原点とし、車両進行方向（前後方向）をX軸、それに直角な方向（左右方向）をY軸にとる。なお、X軸は車両進行と逆方向を正、Y軸は車両進行方向の左手を正とする。また、無次元化された抗力係数 C_D はX軸の正方向を正、横力係数 C_S はY軸の負方向（車両進行方向に対して右方向）を正、ヨーイングモーメント係数 C_M は原点水平面上の反時計回りを正とする。非測定車の中心座標を (X, Y) 、模型の全長を L 、幅を W として、車両の前後間隔および横間隔をそれぞれ無次元化された X/L および Y/W で表す。測定は $-2.0 \leq X/L \leq 2.0$ 、 $1.25 \leq Y/W \leq 2.0$ の範囲で行った。また、本論文において、二台の前後間隔 X/L の範囲を次のような用語で定義する。

$X/L = -1$	: 追い抜き始め
$-0.75 \leq X/L \leq -0.25$	: 追い抜き前期
$X/L = 0$	: 横並び
$0.25 \leq X/L \leq 0.75$	: 追い抜き後期
$X/L = 1$	: 追い抜き終わり

なお、図2の場合、追い抜き終わりの前後間隔 $X/L = 1.5$ 、横間隔 $Y/W = 1.5$ の状態を示す。

風向き角度は、車両進行方向の右手からの風をプラス側、左手からの風をマイナス側とし、それぞれ 5° 、 10° 、 15° の三種類で実験を行った。風洞断面に対するブロックゲージ比は1.25%、実験時の速度は約33m/s、模型全長 L を代表長さとしたレイノルズ数は 5.11×10^5 から 5.52×10^5 の範囲である。また、実験結果を詳細に考察するため、CFDによる解析を行った。CFD解析には三次元熱流体解析システムSCRYU/Tetra Ver.6(ソフトウェアクレイドル社製)を用いた。乱流モデルは標準K-モデルを使用し、車体近傍と後流領域ではメッシュサイズをとくに小さく設定した。解析時の要素数は約150万である。

Fig.1 Experimental device

Fig.2 Geometry of two vehicle models

3. 実験結果と考察

3・1 空力係数の変化

空力係数として、抗力係数、横力係数およびヨーイングモーメント係数の三つを取り扱った。図3～6には二台の車両の横間隔 Y/W の値 1.25, 1.5, 2.0 について風洞実験および CFD 計算を行った結果を示す。いずれの風洞実験結果も前後間隔 X/L の値に対するそれぞれの係数の変化を示している。さらに、これらの風洞実験および CFD による計算結果との対比を行う。なお、最も大きな空力特性の変化が現れた風向き角度 $+15^\circ$ および -15° の結果を代表例として示す。

(1) 抗力係数 C_D : 図3(a)および図4(a)は風洞実験による風向き角度 $+15^\circ$ および -15° における前後間隔 X/L に対する抗力係数 C_D の変化を示す。

風向き角度 $+15^\circ$ では、追い抜き始めの前後間隔 $X/L = -2$ から $X/L = -0.25$ 付近まで、抗力の大きな変化はみられない。しかし、横並びの $X/L = 0$ から追い抜き終わりの $X/L = 1$ の間で抗力が増加する。とくに、追い抜き後期の $X/L = 0.5$ において抗力が最大となる。

風向き角度 -15° では、追い抜き始めの $X/L = -1$ 付近において抗力が減少する。また、追い抜き終わりとなる $X/L = 1$ 付近において鋭いピークを示す。これが風向き角度 $+15^\circ$ の場合と異なる特徴である。

図3(b)および図4(b)は風向き角度 $+15^\circ$ および -15° における CFD による計算結果を示す。いずれの風向き角度の場合も風洞実験の結果である図3(a)および図4(a)と比較すると、 C_D 値は約 0.2 の差があるが、ピークとなる X/L はほぼ一致している。したがって、両者はほぼ同一の傾向を示している。

Fig.3 Variation of drag coefficient C_D versus longitudinal distance X/L at a wind angle of $+15^\circ$

Fig.4 Variation of drag coefficient C_D versus longitudinal distance X/L at a wind angle of -15°

(2) 横力係数 C_s : 実験による前後間隔 X/L に対する横力係数 C_s の変化を図 5(a) に示す . なお , 横力係数は , 車両進行方向に対して右向きの力を正 , 左向きの力を負で表す .

風向き角度 $+15^\circ$ では , 左向きの横力が作用する . 追い抜き始めの $X/L = -1$ 付近および追い抜き後期の $X/L = 0.75$ 付近において , 左向きの横力が減少する .

風向き角度 -15° では , 右向きの横力が作用するが , 追い抜き前期の $X/L = -0.25$ において , 右向きの横力が減少する . しかし , 風向き角度 $+15^\circ$ の場合と異なり , 追い抜き終わりの $X/L = 1$ 付近において右向きの横力が急激に増加しピークとなる . 図 5(b) に CFD による計算結果を示す . いずれの風向き角度の場合も風洞実験の結果である図 5(a) とよく一致している .

Fig.5 Variation of side force coefficient C_s versus longitudinal distance X/L at wind angles of $+15^\circ$ and -15°

(3) ヨーイングモーメント係数 C_m : 実験による前後間隔に対するヨーイングモーメント係数 C_m の変化を図 6(a) に示す . なお , ヨーイングモーメント係数は , 反時計回りを正 , 時計回りを負で表す .

風向き角度 $+15^\circ$ では , 反時計回りのモーメントが作用する . 追い抜き前期の $X/L = -0.5$ 付近においてモーメントがわずかに増加し , 追い抜き後期の $X/L = 0.5$ 付近においてモーメントが小さくなり 0 に近づく .

風向き角度 -15° では , 時計回りのモーメントが作用するが , 追い抜き前期の $X/L = -0.5$ 付近においてモーメントがほぼ 0 になる . 追い抜き後期の $X/L = 0.5$ 付近においてモーメントが大きくなる . 図 6(b) は CFD によるヨーイングモーメント係数の変化を示しているが , これらも実験結果とよく一致している .

Fig.6 Variation of yawing moment coefficient C_m versus longitudinal distance X/L at wind angles of $+15^\circ$ and -15°

Fig.7 Pressure distributions and flow velocities around two vehicle models at both wind angles of $+15^\circ$ and -15°

(4) 空力係数に対する横間隔 Y/W の影響: これら三種類の空力係数の変化(図3~6)より, 風向き角度 $+15^\circ$ では, 測定車と非測定車の横間隔が小さいほど空力特性の変化がみられる。しかし, 横間隔によるその変化の割合にほとんど差がなく, 横間隔の空力特性へ与える影響は小さい。

これに対して, 風向き角度 -15° においては, 横間隔が小さくなると空力特性は大きく変化する。とくに追い抜き後期から追い抜き終わりにかけて, 変動が大きい。したがって, 風向き角度 -15° では, 横間隔が空力特性に大きく影響を与えることがわかる。

3・2 CFDによる圧力分布と流れの可視化

従来の多くの研究により, 車体周りの圧力分布や流れが空力特性に影響を及ぼすことが知られている⁽³⁾⁻⁽⁵⁾。風洞実験により得られた結果のみでは, 空力特性が変化する要因を解明することは不可能である。そこで, CFDによって車体周りの圧力分布および流れを可視化して, その解明を試みる。

CFDの結果において, 車両の横間隔は一般的な車両走行状態に相当する $Y/W=1.5$ を代表例として示す。

図7は, 測定車(白色)が非測定車を追い抜き過程(前後間隔 X/L が -1 から $+1$ まで)における車体周りの圧力分布および流れの変化の様子を示す。図7(a)および(b)に風向き角度 $+15^\circ$, 図(c)および(d)に風向き角度 -15° の場合を示す。なお, 風向きはそれぞれ図中の黒色矢印で示している。図7の下図に示すように, 圧力分布においては, 赤色になるほど圧力が高くなり, 青色になるほど負圧が大きくなる。また, 流れは, 赤色になるほど流速が速くなり, 青色になるほど流速が遅くなる。

以下に, 図7のデータを用いて, 空力特性の変化が大きく, 特徴のある実験結果について考察する。

3・2・1 抗力係数の変化

自動車の抗力は, その大部分が圧力抗力であるので, 測定車の前後の圧力差に着目する。いずれの前後間隔においても測定車の前部は流れを直接受け, 圧力の高い状態となることから, 後部に生じる負圧領域の違いが抗力の変化になって現れている。

(1) 風向き角度 $+15^\circ$: 追い抜き後期の $X/L=0.5$ 付近における抗力の増加(図3)

測定車と非測定車が横並びとなる $X/L=0$ 付近から測定車左後部の負圧が大きくなる領域が生じる。さらに, 追い抜き後期の $X/L=0.5$ から $X/L=1$ までは圧力の低い領域が測定車の後方に拡大する。抗力が最大となる $X/L=0.5$ では, 圧力分布を拡大した図8より, 測定車の車体背面に生じる負圧(黒い円で囲った部分)も大きくなっている。これら負圧の増加が, 追い抜き後期における抗力増加の原因であることがわかる。

Fig.8 Pressure distributions around two vehicle models at a wind angle of $+15^\circ$

(2) 風向き角度 -15° : 追い抜き始めにおける抗力の減少および追い抜き終わりににおける抗力の増加(図4)

図7より, 追い抜き始めの $X/L=-1$ 付近では, 非測定車右側に生じる剥離域に測定車が位置するため, 測定車前方が流れを直接受ける範囲が小さくなり, 圧力の高い部分が小さくなる。したがって, 測定車前後の圧力差が小さくなり, 抗力も減少する。追い抜き終わりの $X/L=1$ では, 測定車前方が流れを直接受けて圧力が高くなる。また, 測定車と非測定車間の流れが加速されることで, 測定車後方に生じる負圧領域が拡大する。その結果, 測定車前後の圧力差が大きくなり抗力が増加することがわかる。

3・2・2 横力係数の変化

(1) 風向き角度+15°：追い抜き始めおよび追い抜き後期における左向きの横力の減少（図5）

図 9(a), (b), (c)および(d)はそれぞれ追い抜き始めの $X/L = -1$ 付近の圧力分布, 空気の流れ, 斜め上および斜め後ろからの車体表面の圧力分布と流れを立体的に流線で示す. 図 9(a)の圧力分布より, 測定車の右側(黒い円で囲った部分)は流れを直接受けるため圧力の高い状態である. 図 9(b)の流れの状況を見ると, 非測定車の左側から急激に測定車の左側面に向かう流れ(赤い円で囲った部分)を確認することができる. 次に, 車体表面の圧力分布と流れを立体的に図示した図 9(c)および(d)を詳細に調べる. 図 9(c)より, 測定車と非測定車間を通る流れ(青い円で囲った部分)が渦を形成するため圧力低下を招く. この渦が図 9(b)および(d)の非測定車の左側からの流れを巻き込み(赤い円で囲った部分), 測定車左側面の剥離が抑制され, 負圧が低減し, 横力を減少させると考えられる.

図 10(a), (b)に追い抜き後期の $X/L = 0.75$ 付近における圧力分布と流れの様子を示す. 非測定車前方で左右に分かれた流れを測定車左側で受けるため, 測定車左側の負圧が小さくなる(図 10(a)の黒い円で囲った部分). また, 図 10(b)に示す車体側面の圧力分布と流線からも, 非測定車前方で分かれた流れを, 測定車左側面で受け, 圧力が高くなることがわかる. その結果, 測定車の左右の圧力差が小さくなり, 横力が減少する.

Fig.9 Pressure distribution and flow velocity around two vehicle models, and pressure distributions at their surfaces and flow structures for $X/L = -1$ and a wind angle of +15 °

Fig.10 Pressure distribution around two vehicle models, and pressure distribution at their surfaces and flow structure for $X/L = 0.75$ and a wind angle of +15 °

(2) 風向き角度 -15° : 追い抜き前期における右向きの横力の減少および追い抜き終わりににおける右向きの横力の増加 (図 5)

図 11 (a), (b)および(c)は追い抜き前期の $X/L = -0.25$ における圧力分布, 流れの様子および非測定車斜め前方からの車体表面の圧力分布と流線を示す. 測定車右側に剥離域 (図 11(b)の黒い円で囲った部分)が生じ, 図 11(a)に示すように測定車右側の負圧は大きくなる. しかし, 測定車と非測定車間の流れが速くなるため (図 11(b)の赤い円で囲った部分), 車両間の負圧が大きくなるとともに, 図 11(c)に示す測定車の左側面前方部の負圧も大きくなる. したがって, 測定車の左右の圧力差が小さくなり, 横力を減少させる.

図 12(a), (b)および(c)は追い抜き終わりの $X/L = 1$ における圧力分布, 流れの様子および非測定車斜め前方からの車体表面の圧力分布と流線を示す. 図 12(a)に示す測定車右側は剥離域となるため負圧である (黒い円で示す部分). 測定車左側は図 12 (b)に示す流れを直接受ける (赤い円で囲った部分) とともに, 図 12 (c)の青い円で囲った部分に示す非測定車前方の流れの影響により, 測定車左側面の圧力が高くなる. したがって, 測定車左右の圧力差が大きくなり, 横力が増加する.

Fig.11 Pressure distribution and flow velocity around two vehicle models, and pressure distribution at their surfaces and flow structure for $X/L = -0.25$ and a wind angle of $+15^\circ$

Fig.12 Pressure distribution and flow velocity around two vehicle models, and pressure distribution at their surfaces and flow structure for $X/L = 1$ and a wind angle of -15°

3・2・3 ヨーイングモーメント係数の変化

(1) 風向き角度 $+15^\circ$: 追い抜き前期における反時計回りのヨーイングモーメントの増加および追い抜き後期における反時計回りのヨーイングモーメントの減少 (図 6)

図 13(a)および(b)には追い抜き前期の $X/L = -0.5$ および追い抜き後期の $X/L = 0.5$ における車体側面の圧力分布および流線を示す.

図 7 より, $X/L = -0.5$ 付近では測定車右側は横風を直接受け, 圧力が高くなる. また, 測定車と非測定車間の流れが加速され, 図 13(a)に示す測定車の左側面前方部の負圧が大きくなる. したがって, 測定車前方部の左右に圧力差を生じ, 反時計回りのモーメントが増加する.

一方, $X/L = 0.5$ 付近では, 図 7 より非測定車前方から左右に分かれた流れを測定車の左側面に受けるため, 図 13(b)に示すように測定車の左側面の圧力を高くする. この圧力の上昇が反時計回りのモーメントを減少させると考えられる.

(2) 風向き角度-15°: 追い抜き前期における時計回りのヨーイングモーメントの減少および追い抜き後期における時計回りのヨーイングモーメントの増加 (図 6)

図 13(c)および(d)には追い抜き前期の $X/L = -0.5$ および追い抜き後期の $X/L = 0.5$ における車体側面の圧力分布および流線を示す。図 7 より, $X/L = -0.5$ 付近では非測定車による流れの影響を受け, 測定車左前部の負圧が大きくなる。また, 図 13(c)に示す車体側面の圧力分布と流線では, 測定車左後部の負圧が小さくなり, 圧力の上昇がみられる。これら圧力分布の変化がモーメントを減少させることになる。一方, 図 7 より $X/L = 0.5$ 付近では, 測定車左側で横風を直接受けるとともに, 非測定車前方の高い圧力によって, 図 13(d)に示す測定車前部の左側面の圧力が高くなる。さらに, 車両間の流れが速くなるため, 測定車左後部側面の負圧が大きくなる。この圧力差により, 時計回りのモーメントが著しく大きくなる。

Fig.13 Pressure distributions at surfaces of two vehicle models and flow structures at both wind angles of +15 ° and -15 °

4. 近接走行時の運転不安定の危険性

以上の結果より, 風向きに関わらず追い抜き始めと追い抜き終わりの走行時に, 抗力, 横力, ヨーイングモーメントがそれぞれ変動することがわかった。特に, 二台の車両が横並びとなる状態から追い抜き終わりまでの走行時に, 横力とヨーイングモーメントが大きく変動した。

次に, 横風が空力特性に与える影響は風向き角度+15°に比べ, 風向き角度-15°の方が大きい。

風向き角度+15°では, 空力特性の変動が大きくなる追い抜き途中から終わりまで, 非測定車が測定車の後流域に位置するため, 空力干渉の影響が少なくなる。

一方, 風向き角度-15°では, 追い抜き始めから横並び状態までの走行期間では, 測定車が非測定車の後流域に位置するため, 横風の影響が弱まる。しかし, その後横並び状態から追い抜き終わりにかけて, 横風に加え非測定車前方の流れの影響も受け, 空力特性の変動が最も大きくなる。

このように, 風向き角度-15°の状態における追い抜き走行時には, 横力およびヨーイングモーメントが一旦小さくなった後, 再び大きくなる。このような追い抜き途中から終わりのまでの期間における横力とモーメントの急激な変化は, 車両同士の接近や離散など不安定な挙動につながり, 運転の危険性を高める。したがって, 高速運転時の追い抜きでは, この期間に走行が不安定になる状況が発生するので, 運転に十分注意する必要がある。

5. 結 言

横風を受けた状態で、近接し平行走行している二台の車両のうち、後続車両が先行している車両を追い抜くときの車両の操縦安定性について、模型風洞実験および CFD による解析を行った結果、以下のような結論が得られた。

- (1) 風向きに関わらず、追い抜き前期と追い抜き終わりに空力特性の変動がみられる。また、車両間の横間隔が小さいほどその変化が大きくなる。
- (2) 風向き角度 -15° では、風向き角度プラスの場合に比べ、空力特性の変化が最も大きい。
- (3) 横風走行時において、測定車（自車）が非測定車（他車）の風下側に位置し、追い抜きを行う場合、空力特性の変動が大きくなり運転が不安定になる危険性が高くなる。また、車両間の横間隔が小さい場合は空力干渉の影響も大きくなるため、車両不安定の危険性は非常に高くなる。
- (4) CFD を用いた圧力分布や流れの可視化により、実車における運転が不安定になる危険性の予測が容易に可能である。

本研究で得られた横風を受けた状態における近接走行に関する知見は、高速道路における大型車の運転に関する注意など、交通教育分野での活用が期待される。

今後、これらの諸条件をさらに詳しく検討することにより、実際の運転における注意事項をより具体的に表すことができるようにすることが課題である。

文 献

- (1) 自動車技術会編，自動車技術ハンドブック基礎・理論編，(1991)，pp. 202-203，自動車技術会。
- (2) Wolf-Heinrich Hucho，*Aerodynamics of Road Vehicles*, (1987)，pp. 223-234, Butterworths.
- (3) 加藤義和，西川弘造，“複数走行時の自動二輪車の空力特性”，自動車技術会論文集，Vol.32, No.4 (2002)，pp.139-144.
- (4) 自動車技術会編，自動車のデザインと空力技術，(1991)，pp.29-63，自動車技術会。
- (5) 炭谷圭二，前田和宏，一之瀬健一，“自動車と流体力学：車体周りの流れと空力特性”，ながれ，Vol.23，No.6，(2004)，pp.445-454。
- (6) 高森浩治，西村宏昭，谷地義人，岡崎充隆，“2棟の高層建築物の空力相互作用”，日本建築学会大会学術講演概要集（関東）（2001），pp.173-174。
- (7) Appupillai Baskaran and Ahmed Kashef，“Investigation of air flow around buildings using computational fluid dynamics techniques”，*Engineering Structures*, Vol. 18, No. 11, (1996)，pp.861-875。