自動車の高速操舵走行時の安定性に寄与する車体周りの非定常流れ特性*

岡田 義浩^{*1}, 農沢 隆秀^{*2}, 坪倉 誠^{*3}, 中島 卓司^{*4}

Characteristics of unsteady flow around a vehicle affecting its high-speed stability during a dynamic steering action

Yoshihiro OKADA^{*1}, Takahide NOUZAWA, Makoto TSUBOKURA and Takuji NAKASHIMA^{*1} Mazda Motor Corporation

Shinchi 3-1, Fuchu-cho, Aki-gun, Hiroshima, 730-8670 Japan

Received 29 September 2013

Abstract

In order to clarify unsteady flow structure's behavior that improves vehicle's high-speed stability during steering input, on-road analysis was conducted. The analysis was conducted on two vehicles' aerodynamic specifications which were produced by configuring two different shapes from a single vehicle. During high speed driving while steering input in sinusoidal waveform was being applied, these two vehicles were analyzed focusing on the relationships between dynamic movements, unsteady forces affecting on vehicle's body surface and unsteady behavior of flow structure. As a result, it was clarified that there existed a unsteady behavior of flow structure that aerodynamically control to stabilize vehicle's steering response motion in vertical and yawing direction. It was also clarified that this aerodynamic force that control to stabilize vehicle's steering response motion was caused by behaviors of flow structure beside body just behind front tire which reduced and expand its vertical scale during high-speed driving with steering input. Furthermore, it was shown that this behavior of flow structure was caused by weakening vortex structure which came out and separated from the gap between the upper rear side of the front wheel and the front wheel arch.

Key Words : High speed stability, Wake, Unsteady flow, Vehicle, Pressure fluctuation

1. 緒 言

近年、自動車の高性能化が進み、走行速度の高速化や快適性の向上が進む中、高速走行時の走行安定性が自動車の重要な開発要素となってきた。自動車の高速安定性は、サスペンションや車体剛性等だけでなく、時速 100 km 以上の高速では、車体への空気力学（空力）も強く影響することが知られている（小林、農沢、1998）。従来、自動車の高速安定性に関する空力開発では、時間平均の揚力係数 C_L 、横力係数 C_S 、ヨーイングモーメント係数 C_{YM} を小さくすることが求められてきた。しかし、近年、これらの時間平均値である空力係数では、高速走行する車両の非定常空力特性を充分捉えられないことが示唆されている（Schroeck, et al, 2011）,（Theissen, et al, 2011）,（Wojciak, et al, 2011）。非定常な空力特性については未だ不明な点が多く、これを理解すれば、高速走行安定性は空力面からより向上できると考えられる。

高速走行安定性に寄与する非定常空力特性については、これまでに直進時の安定性に対し、実走行実験による解析（Okada, et al, 2009）、および CFD を用いた解析（Nakashima, et al, 2009）より、車両のピッチング運動に対する空力ダンピングの存在が明らかにされた。更に CFD 解析（Cheng, et al, 2011）により、この空力ダンピングを生じさせるトランクデッキ上の非定常流れ構造が明らかにされてきた。更に、このような非定常な流れ構造による空力ダンピングが、高速走行で操舵した際の車両の横方向の動きに対しても存在するのではないかと考えら

* 論文 No.13-00721[DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0009]

^{*1} 正員、マツダ（株） 車両実研部 空力実研グループ（〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地 3-1）^{*2} 正員、マツダ（株） 技術研究所^{*3} 正員、北海道大学 大学院工学研究院^{*4} 正員、広島大学 大学院工学研究科

E-mail: okada.yos@mazda.co.jp

れ,近年,操舵走行時の安定性に寄与する非定常空力特性についても研究が実施されてきた.実走行解析(Okada, et al, 2012)の結果,空力的な仕様の違いのみで高速操舵走行時の安定性に優劣がある2車において,安定性が優れた車両は劣った車両に比べ操舵走行時の車両の横方向,ヨーイング方向の運動が空力的な横力,ヨーイングモーメントにより抑制されていることが明らかされた.更に,高速操舵走行のCFD解析(Tsubokura, et al, 2012)の結果,図1の破線で示すフロントタイヤ周りから下流側に渡って生じる渦構造の大きさの違いが,高速操舵走行時の安定性に寄与する可能性が示された.しかし,操舵走行時の車両運動に対し,このフロントタイヤ周りから生じる流れ構造がどのように挙動し,安定性に寄与するのか,その空力的なメカニズムは未だ明確にできていない.この非定常な流れ挙動を明らかにできれば,操舵時の高速走行安定性を空力面から向上させるための知見が得られると考えられる.加えて,このような自動車の車体周りの非定常な流れ構造を理解し,制御することは,自動車を含んだ鈍い物体周りの流れによる空気抵抗や空力騒音の低減にも結び付き,工学上,非常に有用である.

そこで本報では,高速操舵走行時の安定性に寄与するフロントタイヤ周りから下流側に渡る流れ構造の非定常な挙動を明らかにする目的で,実走行による車両運動とその流れ特性の解析を実施する.空力的な仕様の違いのみで高速操舵走行時の安定性に差異がある2車に対し,高速操舵走行時の車両運動と車両側方に掛かる空力的な力,および車両側方の流れ構造の関係を分析し,2車の空力的な力の違いを生じさせる非定常な流れの挙動を明らかにする.その結果から,高速操舵走行時の車両運動を安定させる空力的な制御の可能性について検討する.

Fig.1 Iso-surface of vorticity magnitude at $|\omega|=0.08$ obtained by CFD (Tsubokura, et al, 2012). These figures show that vortex structure generated around front tire of Modified Vehicle-A is smaller than that of Vehicle-A, as shown by dash line. It was assumed that this difference of vortex structure contributed to 2 vehicles' difference in high-speed stability during a steering action.

2. おもな記号

- a_y : 横方向加速度 [m/s²]
- C_D : 空気抵抗係数 [-]
- C_{LF} : フロント揚力係数 [-]
- C_{LR} : リア揚力係数 [-]
- C_{ps} : 静圧係数 [-]
- C_{pt} : 総圧係数 [-]
- C_S : 横力係数 [-]
- C_{S^*} : 横力係数 (* 車体側面の静圧測定値からの計算値) [-]
- C_{SF^*} : フロント横力係数 (* 車体側面の静圧測定値からの計算値) [-]
- C_{SF1^*}, C_{SF2^*} : 前輪軸前側, および後ろ側のフロント横力係数 (* 車体側面の静圧測定値からの計算値) [-]
- C_{SR^*} : リア横力係数 (* 車体側面の静圧測定値からの計算値) [-]

C_{YM} : ヨーイングモーメント係数 [-]

$C\tau(a_y-C_{pd})$: 横方向加速度の時間変化に対する総圧係数の時間変化の相互相関関数 [-]

$C\tau(a_y-C_{s^*})$: 横方向加速度の時間変化に対する横力係数の時間変化の相互相関関数 [-]

t : 時間 [s]

x, y, z : 実走行試験での絶対座標. x : 第一直線路の直進方向, y : 横方向, z : 上下方向 [m]

x', y', z' : 実走行試験での相対座標. x' : 車両直進方向, y' : 車両横方向, z' : 車両上下方向 [m]

δ : 車両のハンドル操舵角 [deg.]

τ : 遅れ時間 [s]

ψ : ヨー角 [deg.]

ψ' : ヨーレート(ヨー角速度) [deg./s]

3. 実験手法

3.1 供試車両

本研究では図2に示す2台のセダンタイプ車両を対象とし、実走行および風洞測定にて解析した。サスペンション特性やボディ剛性の影響を排除するため、これら2台の車両仕様は同じ1台の車両の形状のみを変更している。A車はセダンタイプの市販量産車であり、A改造車はA車に対しフロントピラー形状変更と床下にタイヤデフレクタ、平板アンダーカバー等を取り付けている。A改造車のA車に対する具体的な変更点は図2(b)中に示す。なお、変更に伴うA車、A改造車の質量差は車両総質量の0.3%である。

Fig.2 Testing Vehicles in this study. Vehicle-A is a mid-size sedan type production vehicle. Modified Vehicle-A is produced by installing eight types of aerodynamic parts on Vehicle-A. Aerodynamic parts' differences in two vehicles are shown in Fig. 2(b).

Table 1 Vehicles' aerodynamic characteristics: C_{LF} , C_{LR} , and C_D measured in wind tunnel. These values in 2 vehicles are roughly the same.

	C_{LF}	C_{LR}	C_D
Vehicle-A	0.09	0.11	0.32
Modified Vehicle-A	0.09	0.07	0.30

Fig. 3 Vehicles' aerodynamic characteristics: C_s and C_{YM} measured in wind tunnel. These values in 2 vehicles are roughly the same.

A車, A改造車の空力特性として, 揚力係数を前輪および後輪に掛かる成分に分けた, フロント揚力係数 C_{LF} 値, リア揚力係数 C_{LR} 値, および空気抵抗係数 C_D 値の風洞測定結果を表1に示す. 加えて, 図3には横力係数 C_S 値, ヨーイングモーメント C_{YM} 値の風洞測定結果を示す. 2車間で各空力係数値に若干の差はあるものの, 概ね同等レベルである.

3・2 実験装置および実験手法

走行実験はマツダ三次自動車試験場の第一直線路で実施した. このコースの長さは1.7kmであり, 路面は水平である. なお, 走行実験は無風の日を選び実施しており, 自然風の影響は極めて少ないと考える. 走行試験では120km/h 走行時の車両に, ISOのテスト手法(ISO13674-1, 2010)に準じたSin波状の操舵入力を与えた. 操舵入力の周波数は0.2Hz, 振幅は横方向加速度のピーク値が 2.0m/s^2 となるよう与えた. 図4にこの操舵入力条件を与えた際の車両運動を模式的に示す. Sin波状運動1周期での直進方向に進行する距離は約166.7m, 横方向の振幅は約1.2mである. この条件で走行する車両の動的運動と圧力変動の時系列データを同時計測した.

車両運動として, 車両の位置, 姿勢, 加速度, およびハンドル操舵角の時系列データを測定した. 車両の位置はGPSを用い, 車両の姿勢はGPSを内蔵したジャイロスコプを用いて測定した. なお, GPSを用いた計測器による測定誤差は, 車両位置が0.02m以下, 姿勢角が0.1deg以下と小さい. 車両の加速度は加速度計にて, 車両のハンドル操舵角は操舵角計にて測定した. 本走行実験での絶対座標系を図5に, 相対座標系を図6に示す. 絶対座標系は第一直線路上に図5に示すように定義した. 相対座標系は車両と一緒に動く座標系として図6に示すように定義した. 相対座標系の原点は x 方向を前後輪中心, y 方向を左右輪中心に定めた.

車両周りの圧力変動として, 車両側面の静圧変動, および車両側方の総圧変動を測定した. 車体側面の静圧計測は, 圧力孔を有する厚さ約1mm, 直径約40mmの板状プローブを図7に示すように車両側面に配して行った. 静圧測定点数は車両の左右に各26点, 計52点である. 総圧計測は, $\phi 10\text{mm}$ のキール管を図8に示すように, 車両側方左側のフロントタイヤ後方の x' -一定平面にセットした. 総圧測定点数は30点である(y 方向5点: 50mm 間隔 $\times$ z 方向6点: 100mm 間隔). 圧力計測の基準として, ピトー管を図7に示すように車両のルーフ上に取り付け用いた. このピトー管の測定精度を風洞試験にて確認した結果, ピトー管による車速と風洞車速との差は0.7%程度であり, ピトー管周りの流れはほぼ一様流であった. 静圧値および総圧値の測定にはScanivalve社製Zoc33を用い, サンプリングレート62.5Hzで測定した.

Fig.4 Schematic image of vehicle dynamic motion during the sinusoidal steering input in this study. In one sinusoidal cycle, vehicle moved about 166.7m in x -direction, and vehicle's amplitude in y -direction was 1.2m.

Fig. 5 Absolute coordinate system. This coordinate system was defined on No.1 Straightway as shown in Fig. 5.

Fig. 6 Relative coordinate system. This was defined as coordinate system moving with vehicle. Original point was defined as center point of vehicle's wheelbase and tread.

供試車両の空力特性，および平均総圧分布の測定にはマツダ実車風洞を用いた．本風洞は縮流比 6 : 1 の回流型であり，測定部は，幅 6m，高さ 4m，長さ 12m，最大風速は 230km/h である(橋本他, 1985)．空力特性の測定には，境界層吸取装置を伴った 6 分力天秤装置を用いた．平均総圧測定は，実走試験と同じく $\phi 10\text{mm}$ のケール管を用い，Zoc33 を用いて測定した．

Fig. 7 Measuring points of surface static pressure. Measuring points were 52, 26 in left side and 26 in right side.

Fig. 8 Measuring points of total pressure. Measuring points were 30, 5 points in y' direction $\times$ 6 points in z' direction.

4．結果と考察

本章では，まず 4・1 で空力的な仕様の違いのみで高速操舵走行時の安定性に差異がある 2 車に対し，操舵に対し生じる車両の応答運動の違いを調べる．次に，4・2 で，2 車の車両応答の差異を生じさせる空力的な力の差異を調べる．4・3 では 2 車間での空力的な力の差異が生じる部位を特定する．そして次に，4・4 で，2 車の空力的な力の違いを生じさせる非定常な流れの挙動を調べる．最後に，4・5 で非定常流れと空力的な力の時間変化の関係を分析し，その結果から，車両運動を安定させる空力的な制御の可能性について検討する．

4・1 高速操舵走行時の車両応答

はじめに本報で対象とした，A 車，A 改造車の高速操舵走行時の安定性の差を示す．図 9 は，走行安定性評価を専門とするドライバー 5 人が 2 車の車速 120km/h，および 180km/h での操舵走行時の安定性を官能評価した結果である．この図は横軸が右方向に大きいほど，官能評価結果が高いことを示している．官能評価結果は 2 車速いずれも A 改造車が優れており，特に 180km/h 時には 2 車の差が顕著になる．A 車と A 改造車は 3・1 で上述の通り，サスペンション特性やボディ剛性の影響を排除するため，同じ 1 台の車両を用いており，空力仕様のみの変更している．従って，A 改造車の A 車に対する空力仕様の変更により，この操舵時の安定性の官能評価の優劣の差が生じたものと考えられる．評価したドライバーによる 2 車の比較コメントを以下に示す．

- ・ A 車：高速になると，操舵に対し，車両の応答が過敏で修正しにくい．
- ・ A 改造車：A 車に比べ，操舵に対する応答が穏やかになり，コントロールしやすい．

Fig. 9 Subjective assessment result of high speed stability during steering input. Modified Vehicle-A's assessment results were higher than those of Vehicle-A, and difference in 2 vehicles got larger as vehicle speed increased.

評価者のコメントから、2車間の操舵に対する車両の応答の違いが、官能評価結果の優劣に結びついているものと考えられる。操舵走行時の操舵に対する車両の応答は、車速の上昇に応じて、より強く発生するため、中低速時に比べ高速走行時には操舵入力に対する車両の応答が、より早く、過敏に発生するようになる。このため高速走行時には、操舵入力に対する車両の応答が、ゆるやかに発生する方が、より安定と感じられると一般的に述べられている(佐藤他, 1990),(山本他, 2011)。これは2車の上記コメント、官能評価結果とも合致する。この操舵入力に対する車両応答の関係に着目し、A車、A改造車の安定性の違いを捉えるべく、2車の操舵入力に対する車両応答の関係を定量的に比較した。

図10に、車速120km/hでのSin波状の操舵入力における走行試験での、ハンドル操舵角変化に対する横方向加速度変化、およびヨーレート(ヨー角速度)変化の勾配の平均値、すなわち変化の割合の平均値をA車、A改造車で比較して示す。この勾配の平均値は、それぞれ約30回のSin波状の操舵入力の走行結果から平均して求めた結果である。(a)の横方向加速度、(b)のヨーレートのいずれも、A改造車の方がA車に比べ操舵角変化に対する勾配が小さく、2車の差のA車の値に対する割合は、横方向加速度が3.2%、ヨーレートが1.2%であった。A車とA改造車では上述の通り、空力仕様のみ変更しており、この空力仕様の変更により、ハンドル操舵角入力に対する車両応答としての横方向加速度、ヨーレートの発生が上記分抑えられたと考えられる。この操舵角変化に対する勾配は、ハンドル舵角の単位入力あたりの横方向加速度、ヨーレートの変化の割合であるため、運転者の与えるハンドル舵角の差に依らない車両の特性の違いと考えられる。これらの結果は上記の官能評価のコメントとも一致している。よって、この操舵角変化に対する横方向、ヨー方向の車両応答の違いは2車間の高速操舵走行時の安定性の違いを表わす一つの車両特性であると考えられる。なお、ロール方向等の他の車両の応答では2車間に有意な差は見られなかった。

上述の通り、A改造車のA車に対する空力仕様の変更により、操舵に対する横方向、およびヨー方向の車両応答を抑える力の違いが発生しているものと推察できる。次節では、この操舵に対する横方向、ヨー方向の車両応答を抑える力について、2車の空力的な力の違いを比較する。

Fig. 10 Average gradient of steering wheel angle vs. lateral acceleration and steering wheel angle vs. yaw rate. Modified Vehicle-A's gradient values in both figures were smaller than those of Vehicle-A. These trends indicate that Modified Vehicle-A's steering response motion in lateral and yawing direction were smaller than those of Vehicle-A.

4・2 車両応答の差異を生じさせる非定常空力横力

高速走行におけるSin波状の操舵入力走行時の車両の動的運動と空力横力係数の変化をA車、A改造車で比較した。ここでの車両横力係数は車両側面52点で測定した静圧値に、測定点毎に分割した面積を掛けることにより見積もられたものである。見積もり計算値であることを区別するため、*を付して示す。なお、CFDによる研究結果(Tsubokura, et al, 2012)で、2車間の操舵走行時の空力的な力の違いはフロントタイヤ後方、およびリアタイヤ後方の車体側面で生じていたことから、静圧測定点は図7に示した通り車両側面下側に絞り込んだ。また、横力係数の方向は、図6に示した相対座標系に準じ、車両の直進方向に対し左向き方向を正とした。

図11に横方向加速度 a_y 、ヨーレート $\dot{\psi}$ 、横力係数 C_S^* の時間変化をA車、A改造車で比較して示す。加えて、この横力係数を前後輪の中心で前後に分けたフロント横力係数 C_{SF}^* 、リア横力係数 C_{SR}^* の時間変化も示した。図11(a)、(b)の上側に示した横方向加速度、ヨーレートの変化を見ると、2車とも横方向加速度とヨーレートが

ほぼ同位相で Sin 波状に変化している．図 5 に示した絶対座標系に準じ，横方向加速度は正方向が車両進行方向左向き，ヨーレートは正方向が車両を上から見て反時計回りであり，両者の同位相の正のピーク位置は，車両の左旋回のピークの状態を示している．次に，図 11(a), (b) の下側に示した各横力係数の変化を見ると，A 改造車の方が変動幅が大きい．また，2 車とも各横力係数の変化は 絶対値 0 を中心とした正負対称の分布ではないが，これは試験車両の形状が床下，エンジンルーム内の部品，およびワイパーの配置等が左右非対称であることに起因し，流れ場も非対称性を含むためと考えられる．但し，2 車の各横力係数変化は，横方向加速度，ヨーレートの Sin 波状の変化に対応した Sin 波状の変動が主要に含まれていると観察され，巨視的には左右の対称性を持った横力変化が主要であると考えられる．各横力係数の変化を 2 車で比較すると，A 車(図 11(a))では，図中の矢印で示す様に横方向加速度，ヨーレートが大きくなった際に，横力係数 C_S^* ，フロント横力係数 C_{SF}^* は増加し，リア横力係数 C_{SR}^* はわずかに減少しているように見受けられる．一方，A 改造車(図 11(b))では，図中の矢印で示す様に，横方向加速度，ヨーレートが大きくなった際に横力係数 C_S^* ，フロント横力係数 C_{SF}^* ，リア横力係数 C_{SR}^* が全て減少しているように見受けられる．この傾向を定量的に明らかにするため，横方向加速度，ヨーレートに対する各横力係数の相互相関を求めた．

図 12 に A 車，A 改造車の横力係数 C_S^* ，フロント横力係数 C_{SF}^* ，リア横力係数 C_{SR}^* それぞれの時間変化の，横方向加速度の時間変化に対する相互相関関数 $C\tau(a_y - C_S^*)$ ， $C\tau(a_y - C_{SF}^*)$ ， $C\tau(a_y - C_{SR}^*)$ を示す．なお，ヨーレートの時間変化に対する各横力係数の時間変化の相互相関も同様に調べたが，横方向加速度に対する相関とほぼ同じ結果であったため，ここでは割愛する．図 12(a) の A 車では， τ がゼロ近傍で横力係数 C_S^* の相関が +0.25 レベル，フロント横力係数 C_{SF}^* の相関が +0.6 レベルと正であり，一方リア横力係数 C_{SR}^* の相関は -0.5 レベルと負である．これは，横方向加速度が大きくなった際に，横力係数 C_S^* ，およびフロント横力係数 C_{SF}^* は増加する一方，リア横力係数 C_{SR}^* は減少していることを示している．すなわち，図 13(a) の模式図に示すように，A 車で

Fig. 11 Temporal fluctuation of lateral acceleration, yaw rate and estimated side force coefficients. Here, estimated side force coefficient C_S^* was separated to estimated front axle side force coefficient C_{SF}^* and estimated rear axle side force coefficient C_{SR}^* , and shown in these figures. In Vehicle-A, C_S^* and C_{SF}^* increased and C_{SR}^* decreased while lateral acceleration and yaw rate increased. But in Modified Vehicle-A, C_S^* , C_{SF}^* and C_{SR}^* decreased while lateral acceleration and yaw rate increased.

は、高速操舵走行時の左旋回時に、車両の前側は左側に押され、一方後ろ側は右側に押され、車両全体としては左側に押されていることを示している。そして、図 13(a)の全体および前後の横力の向きから、A 車は左旋回中に横方向加速度、ヨーレートはいずれも、空力的な力により促進されると考えられる。これに対し、図 12(b)の A 改造車では、横力係数 C_S^* は -0.55 レベル、フロント横力係数 C_{SF}^* は -0.25 レベル、リア横力係数 C_{SR}^* は -0.8 レベルといずれも負の相関である。これは、A 改造車では、横方向加速度が大きくなった際に、横力係数 C_S^* 、フロント横力係数 C_{SF}^* 、リア横力係数 C_{SR}^* は全て減少していることを示している。すなわち A 改造車では、図 13(b)の模式図に示すように、左旋回時に、車両は前後とも右方向に押され、全体的にも右方向に押されていることを示している。図 13(b)の全体の横力の向きから、A 改造車は左旋回中に、横方向加速度が抑制されるものと考えられる。ヨーレートについても、A 車(図 13(a))と A 改造車(図 13(b))のフロント横力係数 C_{SF}^* の向きの違いから、A 改造車は A 車比、左旋回中に運動が抑制される方向である。

以上の結果により、高速操舵走行時に、空力的な横力により、操舵入力に対する横方向、ヨー方向の車両応答が、A 車では促進、A 改造車では抑制されていることが明らかになった。4・1 で述べたように、高速走行時には、操舵入力に対する車両応答がゆるやかに発生する方がより安定であると一般的に述べられている。2 車間の操舵入力に対する車両応答を促進、もしくは抑制する空力横力の違いにより、図 9、図 10 に示した 2 車の安定性の差異が生じているものと考えられる。実際に、A 車と A 改造車の横力係数 C_S^* から、横方向加速度を抑制する空気力を見積もったところ、2 車の空気力差は車両運動の横力の 2.6% であり、これは図 10(a)で上述の 2 車の横方向

Fig. 12 Cross-correlation coefficient between lateral acceleration and estimated side force coefficients. In Vehicle-A, around $\tau=0$, cross-correlation coefficient values of C_S^* , C_{SF}^* and C_{SR}^* were about +0.25, +0.6 and -0.5, respectively. In Modified Vehicle-A, around $\tau=0$, cross-correlation coefficient values of C_S^* , C_{SF}^* and C_{SR}^* were about -0.55, -0.25 and -0.8, respectively. These trends indicate aerodynamic side forces direction as shown in Fig. 13.

Fig. 13 Schematic images of the relationship between vehicle dynamic motion and estimated aerodynamic side force coefficients during cornering left. In Vehicle-A, C_S^* , C_{SF}^* and C_{SR}^* promoted vehicle's lateral acceleration and yaw rate. These indicate Vehicle-A's steering response in lateral and yawing direction were promoted by aerodynamic side forces. But in Modified Vehicle-A, C_S^* , C_{SF}^* and C_{SR}^* restrained vehicle's lateral acceleration and C_{SF}^* restrained yaw rate. These indicate Modified Vehicle-A's steering response in lateral and yawing direction were restrained and stabilized by aerodynamic side forces.

加速度の勾配の差 3.2%と同等レベルであった。これは A 改造車の A 車に対する空力仕様の変更の結果、高速操舵走行時に A 改造車に生じる空力横力により、操舵入力に対する車両応答が安定方向に抑制されたことを示唆していると考えられる。

この 2 車間の安定性の差異を発生させる空力横力について、図 13 で A 車と A 改造車を比べると、リア横力係数 C_{SF} は同方向であるが、フロント横力係数 C_{SF} の向きは 2 車で左右逆である。このフロント横力の向きの違いが、2 車間の車両応答を安定させる力の差異に寄与していると考えられる。CFD による研究結果(Tsubokura, et al, 2012)では、A 改造車の車両の動きを抑制し安定させる力はフロントタイヤ後方の車両側面で生じており、本実験においても同様と考えられる。次に、2 車のフロント横力の差異が生じる部位を確認する。

4・3 車両の応答運動を安定させる空力の発生部位

図 14 に、A 車、A 改造車のフロント横力係数の計算値 C_{SF} を横方向加速度 a_y 、ヨーレート ψ' の時間変化と比較して示す。加えて、 C_{SF} を前輪の x 方向中心で前後に分けた前輪前側のフロント横力係数 C_{SF1} 、および前輪後ろ側のフロント横力係数 C_{SF2} の時間変化も同様に示す。図 14(a) の A 車の分布を見ると、横方向加速度、ヨーレートが大きくなった際に、図中の矢印で示す様に、フロント横力係数 C_{SF} 、および前輪後ろ側のフロント横力係数 C_{SF2} は増加しており、その変化量もほぼ同等である。一方、前輪前側のフロント横力係数 C_{SF1} は変化が小さく、横方向加速度、ヨーレートの変化に対応した顕著な傾向が見られない。A 車のフロント横力変化は前輪後ろ側で主に生じており、横方向、ヨー方向の車両応答を促進する空力的な力はフロントタイヤ後方の車両側面で生じていることが伺える。図 14(b) の A 改造車では、横方向加速度、ヨーレートが大きくなった際に、図中の矢印で示す様に、フロント横力係数 C_{SF} 、および前輪後ろ側のフロント横力係数 C_{SF2} は減少しているように見受けられる。また A 改造車でも前輪前側のフロント横力 C_{SF1} は変化代が小さい。A 改造車でも横方向、ヨー方向の車両応答を抑える力が、主にフロントタイヤ後方の車両側面で生じていることが判る。以上より、A 車に

Fig. 14 Temporal fluctuation of lateral acceleration, yaw rate and estimated front side force coefficients. In both vehicle, fluctuations of C_{SF} and C_{SF1} are almost same. These trends indicate that aerodynamic forces that promoted or restrained to vehicle's steering response mainly occurred around vehicle surface beside the body behind front tires.

比べ A 改造車で生じている操舵入力に対する横方向，ヨー方向の車両応答の抑制は，CFD による研究結果 (Tsubokura, et al, 2012)と同様に，フロントタイヤ後方の車両側面で生じていることが確認できた．

図 15 に，2 車の車両応答を抑える力の違いが主に生じている，車両側面フロントタイヤ後方の領域の静圧分布の位相平均値の変化を，Sin 波状の操舵入力走行時の各位相位置毎に示す．図の上に，各位相位置毎の車両側面フロントタイヤ後方の静圧分布を，左右それぞれで示し，下には，左旋回の開始点から左旋回のピークへ移行し

Fig. 15 Change of surface pressure distribution around just behind front tires during cornering motion change. Here, ΔC_{ps} is surface static pressure change between each phase positions. In Vehicle-A, as shown by circles, ΔC_{ps} from Phase 1 to Phase 2 were negative values in left side and positive values in right side. Then, ΔC_{ps} from Phase 3 to Phase 4 were positive values in left side and negative values in right side. But in Modified Vehicle-A, as shown by circles, ΔC_{ps} from Phase 1 to Phase 2 were positive values in left side and negative values in right side. Then, ΔC_{ps} from Phase 3 to Phase 4 were negative values in left side and positive values in right side. These trends indicate aerodynamic forces as shown in Fig. 16.

Fig. 16 Schematic images of the surface pressure change around just behind front tires during cornering motion change. In Vehicle-A, aerodynamic force that promoted vehicle's lateral acceleration and yaw rate occurred on vehicle surface beside the body just behind front tires. In Modified Vehicle-A, aerodynamic force that restrained to stabilise vehicle's lateral acceleration and yaw rate also occurred on vehicle surface beside the body just behind front tires.

た際、およびの右旋回の開始点から右旋回のピークへ移行した際静圧係数の変化 ΔC_{ps} を、左右それぞれ示している。図 15(a)の A 車の分布では、下段の左旋回の開始点から左旋回のピークへ移行した際の静圧係数の変化 ΔC_{ps} を見ると、フロントタイヤ後方左側の車両側面は、図中の 印で示したタイヤハウス直後の前側の領域で負の分布、右側の車両側面は前側の領域で正の分布となっている。そして、右旋回の開始点から右旋回のピークへ移行した際の静圧係数の変化 ΔC_{ps} は逆に、左側の車両側面は前側の領域で正の分布、右側の車両側面は前側の領域で負の分布となっている。これは図 16(a)に示すように、A 車では旋回運動が強くなった際に、左右のフロントタイヤ後方タイヤハウス直後の側面で、旋回運動の横方向加速度、およびヨーレートを促進する静圧変化が生じていることを示している。一方、図 15(b)の A 改造車の分布では、下段の左旋回の開始点から左旋回のピークへ移行した際の静圧係数の変化 ΔC_{ps} を見ると、フロントタイヤ後方左側の車両側面は一部で負であるものの、図中の 印で示すように、全体的には主に下側で正の分布、右側の車両側面は主に下側で負の分布となっている。そして、右旋回の開始点から右旋回のピークへ移行した際の静圧係数の変化 ΔC_{ps} は逆に、左側の車両側面は主に下側で負の分布、右側の車両側面は主に下側で正の分布となっている。これは図 16(b)に示すように、A 改造車で旋回運動が強くなった際に、左右のフロントタイヤ後方車両側面で旋回運動の横方向加速度、およびヨーレートを抑制し、操舵を安定させる静圧変化が生じていることを示している。これらの結果から、A 車、A 改造車で操舵入力に対する横方向、ヨー方向の車両応答をそれぞれ促進、抑制する空力的な力がフロントタイヤ後方の車両側面で生じていることが判り、その局所的な発生部位は、A 車がフロントタイヤハウス直後の側面、A 改造車がフロントタイヤ後方車両側面の主に下側であることが特定できた。

4・4 車両側方の非定常流れ挙動

空力的な力の発生に寄与していると考えられるフロントタイヤ後方の流れ場の非定常挙動を風洞および実走行試験にて解析した。まず、車両が直進した状態での車両周り全体の流れ構造、およびフロントタイヤ後方の流れ構造を過去の研究結果から概観した上で、風洞実験で直進状態での 2 車間のフロントタイヤ後方の流れの構造の差異を分析した。次に、実走行試験にて、フロントタイヤ後方の流れ構造の非定常な挙動を調べた。

まず初めに、図 17 に、過去の研究(農沢他, 2009)で示された、車両が直進した状態でのセダン型車両周りの流れ構造を模式的に示す。図 17 は車両を後方斜め左下から眺めた模式図である。車両周りの流れ構造を左半分のみ示しており、右半分には左側と対称な流れ構造が存在している。車両周り全体の流れ構造としては、まず のフロントピラーの渦はサイドウィンドウから、ルーフを通り、トランクデッキ上へ反時計回りで後曳き渦()に合流する。 のフロントタイヤハウスから吹き出す流れは、時計方向の回転を持ち、車体後方では、まとまる形でトランクデッキ上方へ巻き込む。 のエンジン冷却風の吹き出しによって床下に発生する渦は、反時計回りで後曳き渦()に影響を与える。この模式図から判るように、 , , の渦や流れが強くなると、空気抵抗に支

Fig. 17 Schematic image of flow structure around sedan type vehicle (Nouzawa, et al, 2009). This figure shows only the left half of the vehicle, but symmetric structure exists at the right side. I: front pillar vortex, III: vortices beside lower body and IV: under floor vortex influence to enhance II: trailing vortex.

Fig. 18 Schematic image of vortex structure beside lower body (Nouzawa, et al, 2009). Upper vortex structure occurs from the gap between the upper rear side of the front wheel and the front wheel arch. Lower vortex structure occurs from the lower front region of the front wheel.

配的である後曳き渦()を強化させる方向に働くことが明らかにされている．図 18 には，図 17 の フロントタイヤ後方の流れ構造の模式図を示す．フロントタイヤ周りから下流に渡っては，下側にフロントタイヤ前面下側にあたり，車両後方から見て時計回りの回転方向を持って車両側方に吹き出して生じた渦構造，上側にはタイヤハウス内側から，タイヤハウス外端後方上側の円弧形状に沿って，車両後方から見て時計回りの回転方向を持って車両側方に吹き出して生じた渦構造が存在していることが示されている(農沢他, 2009)．4・3 に示したように，A 車，A 改造車で操舵入力に対する車両応答をそれぞれ促進，抑制する空力的な力はフロントタイヤ後方の車両側面で生じており，このフロントタイヤ後方の流れ構造の違いが寄与していると考えられる．そこで，この流れ構造の違いを分析するべく，2 車のフロントタイヤ後方の総圧分布を比較する．

図 19 に，風洞実験における，フロントタイヤ後方の時間平均総圧分布を示す．A 車(図 19(a))では図 18 に示した 2 つの渦構造に対応した上下 2 つの総圧欠損領域が観察できる．これに比べ，A 改造車(図 19(b))では，図中の印で示した上側の総圧欠損領域が横方向に小さい．A 改造車は，直進走行時では，図 18 に示した上側の渦構造，すなわちタイヤハウス後方上側から車両側方に吹き出し生じる渦構造が，A 車に比べ小さく，弱いことが特徴と考えられる．次に，この特徴的渦構造が，高速操舵走行時にどのように変化するのか，実走行試験にて，フロントタイヤ後方の流れ構造の非定常な挙動を解析する．

図 20 に，Sin 波状の操舵入力走行時に，車両が右旋回から左旋回に移る際の各位相位置での，左側フロントタイヤ後方 x'_I 断面の総圧分布の位相平均値を A 車，A 改造車で比較して示す．なお，図 15 のフロントタイヤ後方車両側面の静圧分布の変化において，2 車とも，巨視的には左右で逆位相，左旋回と右旋回でも逆位相であることが確認されており，フロントタイヤ後方の総圧変化も同傾向であると考えられる．よって，総圧測定は左側のみとし，図 20 に左側の総圧変化を右旋回から左旋回に移った際のみ示した．図 20(a)の A 車の総圧分布を見ると，右旋回から左旋回に移るにつれて，総圧の欠損した領域が車両横方向外側にわずかに膨らむ箇所が見られる(図中に矢印で示す)ものの，全体的には変化は小さい．これは車両が蛇行運動しているにも関わらず，図 18 にて模式的に示したフロントタイヤ後方の渦構造があまり変化していないことを示している．これに対し，図 20(b)の A 改造車では，A 車に比べ，右旋回から左旋回に移る際の総圧分布の変化が大きい．図中に 印で囲み示した高さ方向 z'_3 位置周りの領域では，総圧の欠損した領域が横方向内側へ縮小しているように見受けられる．一方この上側の領域では逆に総圧が欠損した領域が横方向外側へ拡大しているように見受けられる．A 改造車では，蛇行走行中に上側の渦構造による剥離領域が横方向に収縮しており，しかもこれが，旋回内側(左旋回時の左側)で下側は横方向外側に縮小，上側は横方向外側に拡大と逆方向に変化していると推察される．特に下側の z'_3 位置周りは，図 15 で示した操舵入力に対する横方向，ヨー方向の車両応答を抑制する力が生じるフロントタイヤ後方の車両側面下側の位置と近接しており，この流れ場の変化が車両応答の抑制に寄与していると考えられる．これらの流れ場の変化の傾向を定量的に明らかにするため，横方向加速度に対する総圧係数の相互相関を求めた．

図 21 に A 車，A 改造車の Sin 波状の操舵入力走行時の横方向加速度の時間変化に対する左側フロントタイヤ後方総圧の時間変化の相互相関関数 $C_{\tau}(a_y - C_{pt})$ を示す．この図では z 方向位置 z'_3 と z'_5 における総圧の相関関

Fig. 19 Time-averaged total pressure distributions beside vehicle lower body measured in wind tunnel. As shown by circled region, upper total pressure loss region of Modified Vehicle-A was laterally smaller than that of Vehicle-A. It indicates upper vortex structure shown in Fig. 18 is smaller in Modified Vehicle-A than that of Vehicle-A. It is considered that this difference contribute aerodynamic forces difference that promote or restrain vehicle's steering response during dynamic cornering motion.

Fig. 20 Change of total pressure distributions beside the left body during cornering motion change. In Vehicle-A, total pressure distribution changed little while cornering motion changed Phase 1: Cornering right peak to Phase 3: Cornering left peak. But in Modified Vehicle-A, as shown by circled region, total pressure loss region around vertical position $z'3$ changed laterally smaller while cornering motion changed.

Fig. 21 Cross-correlation coefficient between lateral acceleration and total pressure beside body. In Vehicle-A cross-correlation coefficient values were negative around $\tau=0$ at $z'5$ and $z'3$ position. These indicate that vortex structure changed laterally large during cornering left. But in Modified Vehicle-A, cross-correlation coefficient values were positive around $\tau=0$ at $z'3$ position. This indicates that vortex structure around vertical position $z'3$ changed laterally small during cornering left. It is considered that these differences in behaviour of vortex structures just behind front tire contribute aerodynamic forces difference that promote or restrain vehicle's steering response during dynamic cornering motion.

数を5つの横方向(y 方向)位置で示している．図21(a)のA車の相関を見ると， $z'5$ 位置の $\tau=0$ 近傍で負の相関 $z'3$ 位置でも車体側面に近い y' 位置において $\tau=0$ 近傍で負の相関が見られる．これはA車では車両の旋回中に，旋回内側のフロントタイヤ後方の車体側面近くの総圧の欠損領域が横方向に拡大していることを示しており，渦構造の剥離領域が横方向に拡大していると推察される．一方，図21(b)のA改造車の分布では， $\tau=0$ 近傍における上側の $z'5$ 位置では，車体に近い位置で強い負の相関が見られる．下の $z'3$ の位置では，車体に近い位置で $\tau=0$ 近傍の相関値は大きく正である．A改造車では，車両の旋回中に，旋回内側のフロントタイヤ後方の上側で，A車同様に総圧が下がっており，渦構造の剥離領域が横方向に拡大していると推察される．一方，旋回内側のフロントタイヤ後方の下側の領域では，逆に総圧が上がっており，渦構造の剥離領域が横方向に縮小していると推察される．この $z'3$ の位置の総圧変化の傾向は，図15の下段の右旋回から左旋回移行時の静圧変化 ΔC_{ps} で示したフロントタイヤハウス直後の車体側面左側の静圧変化の傾向と同じ傾向である．すなわち，フロントタイヤ後

Fig. 22 Temporal fluctuation of lateral acceleration, yaw rate (upper line graph), total pressure coefficient and surface static pressure coefficient beside the left body just behind front tire (lower line graph). In Vehicle-A, while lateral acceleration and yaw rate increased, total pressure coefficient $C_{pt_z'3_y'1}$ decreased, then surface static pressure coefficients $C_{ps_x'4_z'1}$ and $C_{ps_x'5_z'1}$ decreased. But in Modified Vehicle-A, while lateral acceleration and yaw rate increased, total pressure coefficients increased, then surface static pressure coefficients $C_{ps_x'4_z'1}$ and $C_{ps_x'5_z'1}$ increased. These trends show that differences in unsteady behaviour of vortex structure just behind front tire contribute aerodynamic forces difference that promote or restrain vehicle's steering response during dynamic cornering motion.

方の渦構造の変化が、車体側面の静圧の変化を生じさせ、操舵入力に対する横方向、ヨー方向の車両応答を促進もしくは抑制する力を生じさせているものと考えられる。これを確認するため、次にこのフロントタイヤ後方の領域での総圧変化と車体側面の静圧変化の関係を調べた。

4・5 車両側方の非定常流れと横力の関係

図 22 に、蛇行走行中の横方向加速度、ヨーレート、車両左側のフロントタイヤ後ろ側の総圧およびその近傍と下流側の車体側面の静圧の時間変化を A 車と A 改造車で比較して示す。総圧および静圧の測定位置は図の右に示す。なお、図 15 のフロントタイヤ後方車両側面の静圧変化の結果から、車両の左側と右側では巨視的には逆位相の渦構造変化、および空力的な力の変化が起こっていると考えられるため、総圧および静圧の測定は左側のみとした。図 22(a) の A 車の変化を見ると、図中に矢印で示すように、左旋回運動により横方向加速度、ヨーレートが大きくなった際に、車両に近い $C_{pt_z'3_y'1}$ の総圧が下がり、車体側面の静圧もこの総圧低下に連動して $C_{ps_x'4_z'1}$ 、 $C_{ps_x'5_z'1}$ の 2 か所とも低下している。これは、車両の旋回運動に伴い、旋回内側のフロントタイヤ後方で上下方向 $z'3$ 位置周りで、渦構造による剥離領域が横方向に拡大し、この近傍の車両側面を旋回内側に引き、車両の操舵入力に対する横方向、ヨー方向の車両応答を助長する力を生じさせていると推察される。なお、この総圧と静圧の時間変化の相互相関関数も確認したところ、いずれも 0.8 以上と高い相関であった。一方、図 22(b) の A 改造車の変化では、左旋回運動により横方向加速度、ヨーレートが大きくなった際に、総圧が全体的に上がり、静圧もこの総圧上昇に連動して $C_{ps_x'4_z'1}$ 、 $C_{ps_x'5_z'1}$ の 2 か所とも上昇している。A 改造車では、A 車と逆に、車両の旋回運動に伴い、車両の旋回内側のフロントタイヤ後方の $z'3$ 位置周りで、渦構造による剥離領域が横方向に縮小し、この近傍の車両側面を旋回外側に押し、車両の操舵入力に対する横方向、ヨー方向の車両応答を抑制する力を生じさせていると推察される。なお、A 改造車でも、総圧と静圧の時間変化の相互相関関数は 0.8 以上であった。また、図 22(a), (b) では、横方向加速度、ヨーレートが小さくなった際(右旋回時)には、大きくなった際(左旋回時)と逆の変化が見られ、これは車両の旋回外側では旋回内側と逆位相の渦構造変化、および空力的な力の変化が起こっていることを示している。以上により、車両のタイヤハウス周りの流れの差異により、高速走行時の操舵入力に対する横方向、ヨー方向の車両応答への空力的な抑制が発生し、それは車両の旋回中にフロントタイヤ後方の渦構造による剥離領域が旋回内側では横方向に縮小し、旋回外側では横方向に拡大することにより発生していると考えられることが判った。このような流れの変化を生じさせる観点で、フロントタイヤ周りの流れを適切に制御することを考えれば、車両応答に対し空力的に安定制御する流れを発生させることが可能と考えられる。高速操舵走行時の車両運動を安定させる空力的な制御の可能性が示された。

5. 結 言

高速操舵走行時の安定性に寄与するフロントタイヤ周りから下流側に渡る流れ構造の非定常な挙動を明らかにする目的で、実走行試験により高速操舵走行時の車両運動と車両周りの非定常流れ特性を解析した。その結果、自動車的高速走行時の操舵入力に対する横方向、ヨー方向の車両応答を空力的に安定な方向に制御する非定常な流れ現象の存在が明らかになった。

1. 高速での操舵走行時の安定性の向上は、操舵入力に対する横方向、ヨー方向の車両応答を安定な方向に制御する空力的な力がフロントタイヤ後方の車体側面で生じることに起因している。
2. 高速走行時の操舵入力に対する横方向、ヨー方向の車両応答の空力的な安定制御は、車両の旋回中にフロントタイヤ後方の渦構造が旋回内側では横方向に縮小し、旋回外側では横方向に拡大することにより発生していると考えられる。
3. 2.のフロントタイヤ後方の流れ構造変化は、フロントタイヤハウス後方上側から車両側方に吹き出し生じる渦構造が抑制されたことに起因して生じている。
4. 2.に示したような流れの変化を生じさせる観点で流れの制御を考えれば、渦構造により車両応答を安定方向に制御できる可能性がある。

ただし、車両の旋回中にフロントタイヤ後方の流れ構造が詳細にどのように変化して、車両応答を安定制御する力が生じているかはまだ解明できていない。この非定常な流れ挙動の解明は今後の課題である。

6. 謝 辞

本研究にあたり，実走行実験の実施に多大なご協力戴いたマツダ株式会社 操安性能開発部，および株式会社マツダ E&T 第1車両実研部の皆様に対し感謝の意を表します．

文 献

- Cheng, S.Y., Tsubokura, M., Nakashima, T., Nouzawa, T., and Okada, Y., A numerical analysis of transient flow past road vehicles subjected to pitching oscillation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.99 (2011), pp.511-522.
- 橋本俊博, 橋口真宜, 農沢隆秀, 宮本武司, 中藤博文, 新設風洞の紹介, *自動車技術*, Vol.39, No.7 (1985), pp.822-826.
- ISO13674-1, Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling- Part 1: Weave test (2010).
- 小林敏雄, 農沢隆秀, *自動車のデザインと空力技術* (1998), pp.29-71, 朝倉書店.
- Nakashima, T., Tsubokura, M., Nouzawa, T., Nakamura, T., and Ichimiya, M., Flow structures above the trunk deck of sedan-type vehicles and their influence on high-speed vehicle stability, 2nd report: Numerical investigation on simplified vehicle models using large-eddy simulation, *SAE International Journal of Passenger Cars- Mechanical Systems*, 2(1) (2009), pp.157-167.
- 農沢隆秀, 岡田義浩, 大平洋樹, 岡本哲, 中村貴樹, 自動車の空気抵抗を増大させる車体周りの流れ構造 : 第2報, セダン車体の特徴的な流れ構造, *日本機械学会論文集 B 編*, Vol.75, No.757 (2009), pp. 1807-1813.
- Okada, Y., Nouzawa, T., Nakamura, T. and Okamoto, S., Flow structures above the trunk deck of sedan-type vehicles and their influence on high-speed vehicle stability: 1st Report: On-road and wind-tunnel studies on unsteady flow characteristics that stabilize vehicle behavior, *SAE International Journal of Passenger Cars- Mechanical Systems*, 2(1) (2009), pp.138-156.
- Okada, Y., Nouzawa, T., Okamoto, S., Fujita, T., Kamioka, T., and Tsubokura, M., Unsteady vehicle aerodynamics during a dynamic steering action: 1st report, On-road analysis, *SAE Technical Paper* 2012-01-0446 (2012).
- 佐藤博文, 原口哲之理, 大沢洋, 操舵感に関わる操舵応答特性の考察, *自動車技術*, Vol. 44, No. 3 (1990), pp.52-58.
- Schroeck, D., Krantz, W., Widdecke, N. and Wiedemann, J., Unsteady aerodynamic properties of a vehicle model and their effect on driver and vehicle under side wind conditions, *SAE Technical Paper* 2011-01-0154 (2011).
- Theissen, P., Wojciak, J., Heuler, K., Demuth, R., Indinger, T. and Adams, N., Experimental investigation of unsteady vehicle aerodynamics under time-dependent flow condition – Part 1, *SAE Technical Paper* 2011-01-0177 (2011).
- Tsubokura, M., Ikawa, Y., Nakashima, T., Okada, Y., Kamioka, T. and Nouzawa, T., Unsteady vehicle aerodynamics during a dynamic steering action: 2nd report, Numerical analysis, *SAE International Journal of Passenger Cars- Mechanical Systems*, 5(1) (2012), doi:10/427/2012-01-0448.
- Wojciak, J., Theissen, P., Heuler, K., Indinger, T., Adams, N., and Demuth, R., Experimental investigation of unsteady vehicle aerodynamics under time-dependent flow condition – Part 2, *SAE Technical Paper* 2011-01-0164 (2011).
- 山本忠信, 井芹晴明, 東裕章, 江島勝美, 望月浩孝, 渡邊雅哉, 安野谷知城, 開原真一, SKYACTIV-シャーシ, *マツダ技報*, No.29 (2011), pp.53-60.

References

- Cheng, S.Y., Tsubokura, M., Nakashima, T., Nouzawa, T., and Okada, Y., A numerical analysis of transient flow past road vehicles subjected to pitching oscillation, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, Vol.99 (2011), pp.511-522.
- Hashimoto, T., Hashiguchi, M., Nouzawa, T., Miyamoto T., and Nakato H., Mazda wind tunnel, *Journal of the Society of Automotive Engineers*, Vol.39, No.7 (1985), pp.822-826 (in Japanese).
- ISO13674-1, Road vehicles – Test method for the quantification of on-centre handling- Part 1: Weave test (2010).
- Kobayashi, T., and Nouzawa, T., *Design and Aerodynamic Engineering of Vehicle* (1998), pp.29-71, Asakura Publishing (in Japanese).
- Nakashima, T., Tsubokura, M., Nouzawa, T., Nakamura, T., and Ichimiya, M., Flow structures above the trunk deck of sedan-type vehicles and their influence on high-speed vehicle stability, 2nd report: Numerical investigation on simplified vehicle models using large-eddy simulation, *SAE International Journal of Passenger Cars- Mechanical Systems*, 2(1) (2009), pp.157-167.
- Nouzawa, T., Okada, Y., Ohira, H., Okamoto, S. and Nakamura, T., Flow Structure around vehicle increasing aerodynamic drag : 2nd Report, Characteristic flow structure of sedan vehicle, *Transactions of the JSME Series B*, Vol.75 , No.757 (2009) , pp. 1807-1813 (in Japanese).
- Okada, Y., Nouzawa, T., Nakamura, T. and Okamoto, S., Flow structures above the trunk deck of sedan-type vehicles and their influence on high-speed vehicle stability: 1st Report: On-road and wind-tunnel studies on unsteady flow characteristics that stabilize vehicle behavior, *SAE International Journal of Passenger Cars- Mechanical Systems*, 2(1) (2009), pp.138-156.
- Okada, Y., Nouzawa, T., Okamoto, S., Fujita, T., Kamioka, T., and Tsubokura, M., Unsteady vehicle aerodynamics during a dynamic steering action: 1st report, On-road analysis, *SAE Technical Paper* 2012-01-0446 (2012).
- Sato, H., Haraguchi, T., and Osawa, H., Experimental Analysis of steering response characteristics and steering feeling, *Journal of the Society of Automotive Engineers*, Vol. 44, No. 3 (1990), pp.52-58 (in Japanese).
- Schroeck, D., Krantz, W., Widdecke, N. and Wiedemann, J., Unsteady aerodynamic properties of a vehicle model and their effect on driver and vehicle under side wind conditions, *SAE Technical Paper* 2011-01-0154 (2011).
- Theissen, P., Wojciak, J., Heuler, K., Demuth, R., Indinger, T. and Adams, N., Experimental investigation of unsteady vehicle aerodynamics under time-dependent flow condition – Part 1, *SAE Technical Paper* 2011-01-0177 (2011).
- Tsubokura, M., Ikawa, Y., Nakashima, T., Okada, Y., Kamioka, T. and Nouzawa, T., Unsteady vehicle aerodynamics during a dynamic steering action: 2nd report, Numerical analysis, *SAE International Journal of Passenger Cars- Mechanical Systems*, 5(1) (2012), doi:10/427/2012-01-0448.
- Wojciak, J., Theissen, P., Heuler, K., Indinger, T., Adams, N., and Demuth, R., Experimental investigation of unsteady vehicle aerodynamics under time-dependent flow condition – Part 2, *SAE Technical Paper* 2011-01-0164 (2011).
- Yamamoto, T., Iseki, H., Higashi, H., Ejima, K., Mochizuki, H., Watanabe, M., Anotani, T. and Kaihara, S., SKYACTIV-CHASSIS, *Mazda Technical Review*, No.29 (2011), pp.53-60 (in Japanese).