定常円旋回時の自動車に作用する空気力について

中島 卓司^{*1}, 坪倉 誠^{*2,*7}, 岡田 義浩^{*3}
農沢 隆秀^{*4}, 溝兼 通矢^{*5}, 土井 康明^{*6}

Aerodynamic force acting on a road vehicle in steady-state cornering

Takuji NAKASHIMA^{*1}, Makoto TSUBOKURA^{*2,*7}, Yoshihiro OKADA^{*3},
Takahide NOUZAWA^{*4}, Michiya MIZOKANE^{*5} and Yasuaki DOI^{*6}^{*1,*6} Institute of Engineering, Hiroshima University

1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima 739-8527, Japan

^{*2} Faculty of Engineering, Hokkaido University

13 Kita, 8 Nishi, Kita-ku, Sapporo 060-8628, Japan

^{*3,*4} Mazda Motor Corporation

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

^{*5} Graduate School of Engineering, Hiroshima University

1-4-1 Kagamiyama, Higashi-Hiroshima-shi, Hiroshima 739-8527, Japan

^{*7} RIKEN Advanced Institute for Computational Science (RIKEN AICS)

7-1-26 Minatojima-minamimachi, Chuo-ku, Kobe, Hyogo 650-0047, Japan

Received 4 June 2014

Abstract

The objective of this study is to investigate aerodynamics and its generating mechanism of a road vehicle in steady-state cornering, which is the most basic cornering condition. The vehicle motion in the steady-state cornering was defined on a frame of reference fixed on the vehicle and it was divided into a rotation around a vertical axis and a sideslip. Then, aerodynamic force generated by each motion and its generating mechanism was discussed. In order to reproduce an effect of the rotational motion, a towing tank experiment was conducted to measure the fluid-dynamic force acting on a one-fifth-scale model of a sedan-type road vehicle. Assuming that the fluid-dynamic forces are expressible as a linear superposition of effects of the rotation and sideslip, first derivatives of the side force and yaw moment with respect to the yaw rate and the lateral velocity were analyzed by a multiple linear regression analysis. From the results of measurement and analysis, it was clarified that the assumption can provide good approximations of the force and the moment within a range of measurement conditions in this study. Regarding the fluid-dynamic side force, the rotation generates a centripetal force of the circular motion and the sideslip generates a force suppressing the slip motion. Regarding the fluid-dynamic yaw moment, the rotation generates a moment suppressing the rotation, and the sideslip generates a moment enhancing the vehicle's slip angle. Aerodynamics of a sedan-type road vehicle was estimated quasi-steadily by multiple regression equations with measured vehicle motion in an on-road test. From this estimation, the effects of both the rotation and the sideslip had the same order of magnitude. This result indicates that the effects of the vehicle's rotational motion have the same level of importance as the effects of the sideslip in vehicle aerodynamics in steady-state cornering.

Key words : Aerodynamics, Road vehicle, Steady-state cornering, Yaw motion, Towing tank experiment

1. 緒 言

近年、車両の軽量化や環境負荷低減の観点から、自動車開発における空力設計の重要性が高まっている。注目

No. 14-00300 [DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0301]

^{*1} 正員, 広島大学 大学院工学研究院 (〒739-8527 広島県東広島市鏡山 1 丁目 4-1)^{*2} 正員, 北海道大学 大学院工学研究院 (〒060-8628 北海道札幌市北区北 13 条西 8 丁目)^{*3} 正員, マツダ(株) 車両実研部 (〒730-8670 広島県安芸郡府中町新地 3-1)^{*4} 正員, マツダ(株) 技術研究所^{*5} 広島大学 大学院工学研究科^{*6} 広島大学 大学院工学研究院^{*7} 理化学研究所計算科学研究機構 (〒650-0047 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-26)

E-mail of corresponding author: nakashima@hiroshima-u.ac.jp

される空力性能としては、燃費性能に直接寄与する空気抵抗が最重要項目であり、現在の設計開発では、一様流下で車両姿勢を固定した条件での定常6分力評価が主となっている。これに対して最近では、高速走行時の直進安定性や横風に対する安全性、さらには操舵時の安定性等に対する空力性能向上のニーズが高まっている。例えば、走行中の車両に作用する変動風外乱や路面凹凸などの外乱に伴う車両姿勢変化に対する空力安定性の影響について、車両を強制加振して模擬することにより、その過渡的空気力を計測した風洞実験(河上他, 2010, Theissen, et al., 2011)や非定常乱流シミュレーション(佐藤他, 2010, Cheng, et al., 2013)が報告されている。一方、このような走行中の外乱に対する受動的な運動安定性に対して、運転手による操舵を考慮したより能動的な車両運動に対する空力安定性(空力操安性)についても、近年、実車走行試験に基づく計測(岡田他, 2014)や、数値シミュレーション(Tsubokura, et al., 2012)が実施され、特に蛇行運動時の安定性に寄与する非定常流れ現象の存在が指摘されている。しかしこのような操舵時の車両に作用する空気力については、既存の風洞実験設備では現象の再現が難しい上、その空力発生要因が複合的であることから、十分な理解がされているとは言えないのが現状である。

操舵時の自動車の主要な運動は、車両の軌道変更に伴う旋回運動であり、これは直進走行時の車両運動に対して、車両重心を通る鉛直軸周りの回転運動(ヨー運動)と横すべり運動(タイヤのすべりに伴う車両横方向への運動)が複合した合成運動とみることができる。(一般的な操舵運動では、そのような水平面内の運動に車両前後軸周りの回転運動(ロール運動)を主とする鉛直方向の運動が加わることで、さらに複雑なものとなっていることに注意されたい。)したがって旋回運動を車両が地表に対して相対的に回転する運動であると捉え、この運動を風洞等の一様流下で再現すべく車両に強制的なヨー回転を加えることも考えられるが、この場合、車両の回転に伴って接近流の風向が変化することから、実際の旋回運動(例えば、定常旋回運動であれば接近流の車両に対する風向は変化しない)とは条件が異なってしまう。このような実験の困難さから、自動車の空力において旋回走行時の回転運動の影響を独立に議論した例は非常に少ない。このため、操舵時の主要運動である旋回運動に起因して生じる空気力を評価し、特にその回転運動による影響を調べることは、より適切な空力操安性評価を行う上で重要な課題となっている。

そこで本研究では、旋回運動のうち最も基本的な定常円旋回運動に着目し、車両に作用する空力とその発生メカニズムについて調べることを目的とする。そのため、定常円旋回時の車両運動を、車両に固定した座標系に基づいて鉛直軸周りの回転運動と横すべり運動に分解し、各運動に対して発生する空気力について明らかにするとともに、その発生メカニズムについて考察する。特に回転運動の効果を再現するために、風洞実験に替わってここでは曳航水槽を用いた水槽実験を行い、車両模型に作用する流体力を計測する。

2. 記 号

B	: 車両模型全幅	r	: 車両の旋回角速度
C_D	: 抗力係数	r'	: 無次元旋回角速度 $r' = rL / U$
C_{Lf}	: 前輪軸位置における揚力係数	R	: 旋回円半径 $R = U / r$
C_{Lr}	: 後輪軸位置における揚力係数	u	: 実車重心相当位置における車両前後方向の併進速度
C_S	: 横力係数	U	: 実車重心相当位置における並進速度の大きさ $U = (u^2 + v^2)^{1/2}$
C_{S0}	: C_S の近似式における定数項	v	: 実車重心相当位置における横方向並進速度
C_{YM}	: ヨーモーメント係数	v'	: 無次元横すべり速度 $v' = v / U$
C_{YM0}	: C_{YM} の近似式における定数項	v_b	: 車両模型回転中心における横方向並進速度
D	: 曳航時の車両模型の没水深さ	x, y, z	: 車両固定空間座標
d_F	: 仮底平板の没水深さ	x_b	: 車両模型回転中心の x 座標
Fr_d	: 模型没水深さに基づく Froude 数	X, Y	: 地上固定静止座標系の水平面内座標
g	: 重力加速度	Y_v	: C_S の v' に対する1次の微係数
h	: 曳航時の車両模型全高 $h = H + h_c$	Y_r	: C_S の r' に対する1次の微係数
h_c	: タイヤ下面と仮底平板の隙間高さ		
H	: 車両模型全高		

L : 車両模型全長	β : 実車重心相当位置におけるすべり角 $\beta = \sin^{-1}(v/U)$
L_w : 車両模型ホイールベース長さ (前後輪軸間距離)	β_b : 車両模型回転中心におけるすべり角 $\beta_b = \sin^{-1}(v_b/U)$
N_v : C_{YM} の v に対する 1 次の微係数	ψ : 車両前後軸の X 軸に対する傾き角 (ヨー角)
N_r : C_{YM} の r に対する 1 次の微係数	

3. 手 法

3・1 対象車両形状

本研究で対象とする車両形状について述べる．本研究で注目する旋回運動中の自動車の空力特性については，関与する流動メカニズムが明らかになっていないため，自動車の周囲に形成される多くの特徴的流れ構造（農沢他，2009）を再現した形状を対象に検討することが必要と考えられる．そこで，そのような流れ構造の形成が確認されており，また，高速操安性のニーズも高いセダン型車両を対象車両として選択した．ただし，実際の計測対象形状としては，対象としたセダン型車両周りの流れ構造を模擬しながら，エンジンルーム等を除き，車両の形状を一部簡略化したモデル形状(Tsubokura, et al., 2012)を用いることとした．車両寸法は，曳航水槽試験設備の大きさや水面の影響等を考慮して実車 1/5 スケールの縮小模型とし， $L=0.934\text{m}$, $L_w=0.535\text{m}$, $B=0.391\text{m}$, $H=0.278\text{m}$ である．同車両モデルの正面斜視図および五面図を図 1 に示す．正面斜視図中には，走行する車両に固定された座標系（本稿では，以降「車両固定座標系」と称する）の座標軸とその軸周りの回転の定義を併せて示した．本稿で用いる車両固定座標系は，車両前後方向の前向きを x 軸正，車両左右方向の左向きを y 軸正，車両高さ方向の上向きを z 軸正とした座標系である．また， x, y, z 各軸周りの回転については各軸の右回り方向を正とし，それぞれロール，ピッチ，ヨーと呼称することとする．なお，座標系の原点は本自動車モデルの原型であるセダン型乗用車の重心位置を参考に決定し，その車両前後方向位置は，前後輪軸間の中心（ホイールベースセンタ）から $0.064 L_w$ 前方，車両左右方向位置は車両中心とした．本稿ではこの座標系を用いて車両運動を定義するとともに，各軸方向の力および各軸周りのモーメントとして発生流体力を整理する．

Fig.1 Simplified model of a sedan-type road vehicle. A one-fifth-scale model of this simplified vehicle's geometry is an objective of this study. Figure (a) includes definitions of coordinate axes fixed on the vehicle and rotations around the axes.

3・2 車両運動の定義

水平面内を定常円旋回運動している自動車は，車両固定座標系で見た場合， x 軸および y 軸方向の車両重心の並進運動と，重心を通る z 軸周りの回転運動が合わさった，合成運動とみることができる．ここで，前者の並進速度と後者の回転角速度の積が，車両重心が円周軌道を描く公転運動を表現し，後者の回転運動が車両の重心回りの自転運動を表現する．ところで，車両が旋回運動をするためには，各タイヤが横すべりしてタイヤ力を生じて横力とヨーモーメントを発生する必要がある．タイヤの横すべりは，操舵によるタイヤの傾きに加え，車両に生じる重心回りのヨー回転運動と車両重心の横移動によって与えられる．このため，旋回運動中の自動車は，通

Fig.2 Target vehicle motion and its parameters. Figure (a) shows the definition of parameters describing the vehicle motion in cornering. The motion is divided into two components—yaw rotation and sideslip motion—and they are parameterized by an angular velocity in the yaw direction r (yaw rate) and a lateral velocity v , respectively. Figure (b) shows a schematic view of steady-state cornering in the case of left turning described by the parameters defined in Figure (a).

常、車両の重心位置において横方向の速度 v （以降、横すべり速度と称する）を生じている。即ち、旋回運動する車両は車両前後軸から角度 $\beta = \sin^{-1}(v/U)$ だけ傾いた斜め前方へ並進運動していることが一般的である。定常円旋回運動する自動車においては、空気力を無視すると車両の慣性力とタイヤ力が釣り合状態にあり、 U , r , および車両重量とタイヤ特性から β が決まる。なお、このすべり角 β は図 2(a) に示す通り、一般的な翼の迎角とは定義が逆であることに注意されたい。また、本稿では β を直接の旋回運動パラメータとして用いず、旋回運動を z 軸周りの回転角速度である旋回角速度 r と車両前後方向速度 u , および横すべり速度 v によって表現することとする。すると、本研究で対象とする定常円旋回運動は、図 2 (b) に示すように、 r, u, v が時間的に一定であり、かつ r が 0 ではない値（図の時計回り旋回時では、 u, v は正で r は負）となる状態と言い換えることができる。また、本稿では車両運動を表すパラメータとして、 r, v をそれぞれ無次元化した $r' = r/(U/L)$, $v' = v/U$ を用いることとする。このとき、 $U \gg v$ であれば $\beta \approx v'$ である。なお、一定速度以上の車速での定常円旋回運動においては、 $r' > 0$ のときに β は負、即ち $v' < 0$ となることが知られており（安倍, 2012）、一般的な高速走行条件における定常円旋回運動では r' と v' は異符号となる。また、実際の自動車による定常円旋回運動では、 z 軸方向の定常変位と x 軸および y 軸周りの定常回転角も発生するが、ここではそのような鉛直方向の定常的な車両姿勢変化は無視することとする。

3・3 曳航水槽試験法

3・3・1 曳航水槽試験装置

本研究で用いた広島大学所有の曳航水槽試験装置の概略を図 3 に示す。同水槽試験装置は、水槽両脇に敷設された線路上を走行するモータ駆動の台車（以降、主台車と称する）が、長さ 100m, 幅 8m, 高さ 3.6m の水槽上方を長さ方向に移動し、その下方に支持された模型を曳航することで、模型に作用する流体力や模型周囲の流場を計測する試験装置である。また、主台車上には、模型を固定して水槽幅方向の並進運動と鉛直軸周りの回転運動を与える機構（以降、副台車と称する）が設置されている。本研究ではこれらを用いて車両模型に x, y 方向の

Fig.3 Schematic views of a towing tank facility. The vehicle model was towed by a main towing carriage in the longitudinal direction of the tank, and it was also actuated in the span wise direction of the tank and in the rotational direction around the vertical axis by a sub-carriage installed on the main carriage. The vehicle running on the ground was simulated by the model towed above a temporary floor, which was installed in the middle of the tank at a depth of 1.0 m.

並進運動と z 軸周りの回転運動を与え、主副両台車を連動制御することで定常円旋回運動および直線運動を与えた。また、水槽中央部に長さ 18 m、幅 4.75m の浅水域試験用の昇降式仮底が設置されており、この平板を水深 1.0m の位置に固定することで地面に見立て、その直上で自動車モデルを曳航することにより地上を走行する自動車を模擬した。

供試模型は、切削加工用合成木材（三洋化工株式会社製サンモジュール No.8K）を NC 加工して製作した。その外観写真と内部構造図、および曳航時の設置概略図を図 4 に示す。同模型は車両下部および左右上部の 3 部品から成り、支柱が貫通するための翼型穴と検力装置を内蔵可能な内部空間を有する。副台車下部に固定された支柱が、模型上面の翼型貫通穴を通して模型内部の防水型 6 分力検出器（日章電機株式会社製 LMC-6566A -200NWP）を支持し、模型はその 6 分力検出器の検力面に固定される形で支持されている。このような模型支持構造とすることで、検力値から支柱に作用する外力を排除し、模型のみに作用する外力を計測した。なお、6 分力検出器の検力中心位置は、車両幅方向にはその中央、車両前後方向には浮力と重力の合ピッチモーメントがゼロとなる点とし、副台車の回転機構の回転軸も、この点を通るようにした。（この場合、 x 座標は $x_b = -0.167L_w$ となった。）ただし本稿では、運動パラメータや計測されたモーメントについて、すべて 3・1 節で定義した車両固定座標系原点を基準とする値に変換して記載している。また、支柱は模型近傍の流れ場を極力乱さないようステンレス製円柱後部に樹脂製の翼型カバーを付加した翼型断面構造とし、水面近傍には支柱による造波を抑制するためのアクリル製円盤を付加した。計測に用いた 6 分力検出器の出力は、直流型歪増幅器（日章電機株式会社製 DSA -100B）により増幅し、A/D 変換ボードによるデジタル化を行って、サンプリング間隔 10 ms で PC に記録した。

Fig. 4 Schematic views of an experimental model and a measurement system. A six-component load cell was installed in the one-fifth-scale vehicle model, as shown in Figure (b). The model was connected to the sub-carriage through a six-component load cell and a circular strut with an airfoil cover. In the present configuration, the parameters Fr_d defined in Eq. (1) and d/h , which are related to the free surface effect, are set to be 0.34 and 2.6, respectively. These values satisfied the conditions $Fr_d < 0.37$ and $d/h > 2.0$ to make the influences of the water surface on the fluid force negligible (Kanai, et al., 1991).

3・3・2 試験条件

試験条件として、はじめに車両進行速度 U に相当する曳航速度について述べる。自由表面近くを進行する物体には、物体周囲の流れと自由表面との干渉が生じ、自由表面の造波現象も伴うことで、無限流体中を進行する場合とは異なる流体力が作用する。金井ら(金井他, 1991)は、曳航水槽中の仮底平板上で 1/5 スケールのセダン型乗

用車模型を曳航し、曳航条件と自由表面影響との関係について調査した。その結果、乗用車模型の抗力および揚力に対する自由表面影響は、模型の没水深さ d 、曳航時の模型全高 h および曳航速度 U から定まる 2 つのパラメータ d/h 、 Fr_d に依存し、それぞれ $d/h > 2.0$ 、 $Fr_d < 0.37$ を満足する条件下であれば、模型に作用する流体力における自由表面影響が十分小さくなることを報告している。ここで、 Fr_d は

$$Fr_d = \frac{U}{\sqrt{dg}} \quad (1)$$

で定義され、 h, d については図 4 中に図示した通りである。そこで本研究では、上記の条件を満足するよう曳航速度 U を 0.9 m/s に設定した。また、タイヤ下面の仮底平板からの高さ h_c は 0.005 m とし、模型の没水深さ d を 0.72 m とした。これによりパラメータ d/h および Fr_d はそれぞれ $2.5, 0.34$ となり、いずれも金井らによる条件を満足することから、自由表面影響については十分小さいものとみなして計測を実施した。なお、実験時の平均水温は 8.5°C であり、曳航速度と純水物性、および模型全長に基づく Reynolds 数は 6.0×10^5 である。

次に、曳航軌跡と車両姿勢条件、即ち前節で定義した r' および v' の試験条件について述べる。前節でも述べた通り、本論文では車両の鉛直方向姿勢変化を無視することとし、一定の r' 、 v' のみを強制的に模型車両に与えることとした。すなわち、実際に巡回走行する自動車において生じる空力現象のうち、鉛直方向の姿勢変化や水平面内の非定常的な運動による空力特性への影響についてはこれらを排除し、定常的な水平面内運動の影響によって生じる空力特性を計測した。両パラメータの設定にあたっては、岡田ら(岡田他, 2014)による実車蛇行走行試験において計測された車両運動を参考に、その計測範囲を決定した。同実車走行試験では、 120 km/h 走行時の車両に ISO のテスト手法(ISO13674-1, 2010)に準じた正弦波状の操舵入力を与え、図 5 の概念図に示すような蛇行軌跡で車両が走行した際の車両運動が計測されている。同試験における操舵入力の周波数は 0.2 Hz 、横方向加速度の最大値は 2.0 m/s^2 であり、これらは一般的な走行状態(佐藤他, 1990)と同程度であることから、計測された車両運動パラメータも一般的な巡回走行において生じる値と考えられる。計測された巡回角速度は横変位が最大となる軌跡の山と谷の頂点近傍で絶対値が最大となり、その値は $|r'| = 0.0076$ であった。また、すべり角 β も蛇行軌跡の頂点(図中(B)と(D))において絶対値が最大となり、その値は $|\beta| = 0.24^\circ = 0.0042 \text{ rad}$ であった。これを無次元横すべり速度に換算すると、 $|v'| = 0.0042$ に相当する。ただし、図に示すように蛇行軌跡の頂点において車両は軌跡の接線の内側を向いており、巡回角速度とすべり角は互いに逆向きである。このため、蛇行軌跡の頂点において r' と β は異符号であり、 v' もまた r' と異符号となっている。

Fig.5 Schematic view of an on-road measurement conducted by Okada *et al.* (Okada, et al., 2014). The vehicle drew a sinusoidal trajectory, and its motion parameters at Points (A) to (D) are shown in the boxes. At Points (B) and (D), which are the right- and left-turning peaks of the trajectory, the nondimensional yaw rate and lateral velocity show their maximum magnitudes, although they have opposite signs.

以上の岡田らによる実走試験計測結果を基に、本研究での計測条件として r' には $0, \pm 0.0075, \pm 0.015, \pm 0.030$ の7条件を設定した。これらを実車寸法の旋回半径 R に換算すると、それぞれ $\infty, 620 \text{ m}, 310 \text{ m}, 160 \text{ m}$ となる。また、 v' に関しては模型回転軸位置 $x=x_b$ におけるすべり角 β_b が $0, \pm 0.5^\circ, \pm 1.0^\circ$ となる5条件を設定した。ただし、座標原点における横方向速度は旋回角速度に伴って $v=v_b+r x_b$ となるので、 r' に応じて v' の設定値は変化することとなる。このため v' の設定範囲は $-0.018 \sim 0.018$ となる。これら r', v' の条件を重ね合わせた計35条件において計測を行った。また、 $r'=0$ の場合に限っては上記条件に加えて β が $\pm 1.5^\circ, \pm 2.0^\circ$ の4条件でも計測を行った。

3・3・3 計測結果の処理

曳航水槽試験では、静止状態から模型を加速し、模型が仮床上において設定曳航速度での定常曳航状態に達して、計測流体力が安定した後から、10秒間、9mを計測区間とする流体6分力の計測を行った。なお、各計測条件について、それぞれ1回の試験を実施した。図6に曳航中に6分力計により計測された流体力の時系列データを例示する。グラフは $r'=-0.03, v'=-0.0026$ の条件で計測された x, y 軸方向の力 F_x, F_y と z 軸周りのモーメント M_z を示しており、計測データを薄線で、0.1秒間の移動平均を施したデータを太実線で、それぞれ示している。

なお、旋回角速度を伴う計測では、車両模型が向心方向に加速度をもつため、計測される力とモーメントには模型自身の慣性の影響が含まれる。そこで、模型（6分力計内蔵スペース内の水塊を含む）の質量と重心位置を計測し、模型の速度と角速度を基に遠心力を算出して、計測された横力とヨーモーメントの時間平均値から、それぞれ減算することで各流体力を抽出した。

Fig.6 Time series of fluid-dynamic forces in longitudinal and lateral directions F_x and F_y and moment around a vertical axis M_z acting on the vehicle model measured in the towing tank experiment ($r'=-0.03, v'=-0.0026$). Profiles of the raw data (translucent lines) and the 0.1-s moving average (thick solid lines) are drawn in the graph. Black, red, and blue colors mean F_x, F_y , and M_z , respectively. The measurement period was 10 s while the model was steadily towed above the temporal floor plate. Forces and moments shown in a later section are the averaged value in this measurement period.

また、計測結果の流体力 F および流体力モーメント M は無次元化し、無次元係数として整理した。流体力係数 C_F および流体力モーメント係数 C_M は、 F および M に対して、それぞれ以下のように定義した。

$$C_F = F / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 A \right) \quad (2)$$

$$C_M = M / \left(\frac{1}{2} \rho U^2 A L_w \right) \quad (3)$$

なお、本稿では、 x 軸負方向の抗力 $-F_x$ 、 y 軸方向の横力 F_y 、前後輪軸位置に作用する z 軸方向の揚力 F_{zf}, F_{zr} 、および z 軸周り回転方向のヨーモーメント M_z に対する係数を、それぞれ抗力係数 C_D 、横力係数 C_S 、前後輪軸位置における揚力係数 C_{Lf}, C_{Lr} 、およびヨーモーメント係数 C_{YM} と呼称することとする。

4. 試験結果と考察

4・1 直進時及び横すべり運動による発生流体力

計測手法の基礎検証のために、風洞実験が可能な、車両のヨー回転運動を考慮しない直進すべり走行時の運動を対象とした計測結果を示す（図2(b)の車両運動軌跡が直線の場合）。即ちここでは、 $r'=0$ とし、横すべり速度 v' をパラメータとする。これは自動車が発常的な横すべりを伴いながら一定速度で直進走行する状態である。ここでは、対象車両モデルの流体力特性を確認するとともに、対象模型の原型であるセダン型乗用車の実車風洞試験結果(岡田他, 2014)を参考値として、本研究における車両模型を用いた曳航水槽試験の妥当性を検証する。

まず、直進状態($r'=v'=0$)の流体力特性として、表1に各流体力係数を示す。車両形状や地面条件、Reynolds数などが異なるものの、抗力係数に関しては実車風洞条件とほぼ同等の値を示しており、セダン型自動車を模した形状として、その流体力特性も再現されていることを示している。一方、揚力係数については、特に前輪軸位置での揚力係数 C_{Lr} に符号の逆転が生じている。この要因としては、風洞試験では地面と車両の相対速度が考慮されていないため床下流入流速が少なく、床下圧力の低下が少ないと考えられること、曳航水槽試験ではタイヤ部が地面に接地しておらずタイヤ下で縮流による負圧が作用すると考えられること、および、模型支持のためのストラットにより車両上面前方の圧力が増大しうることが挙げられる。

Table 1 Aerodynamic coefficients measured in a straight towing condition. The coefficients measured in the current towing tank experiment are compared with the previous wind tunnel experiment of a real sedan-type vehicle (Okada, et al., 2014). The present experimental model shows similar aerodynamic characteristics of the real vehicle, although the C_{Lr} has a different sign because of the different conditions of the ground, tires, and strut from the wind tunnel experiment.

	C_D	C_{Lr}	C_{Lr}	C_s	C_{YM}
Present towing tank experiment (A simplified one-fifth-scale model)	0.346	-0.106	0.149	0.044	-0.003
Wind tunnel experiment (Okada, et al., 2014) (A real sedan-type vehicle)	0.32	0.09	0.11	0.00	0.00

次に、横すべり運動に伴って生じる車両への作用流体力の変化について図7に示す。グラフはすべり角 β に対する横力係数およびヨーモーメント係数の直進状態からの変化量 ΔC_s 、 ΔC_{YM} を示している。

図7のグラフが示すように、すべり角が正側へ変化するに伴い、横力係数、ヨーモーメント係数はともに負側へと値が変化する。即ち、車両が左斜め前方へ進行する場合に、車両右向きの横力と車両を右旋回方向へ回転さ

Fig.7 Dependencies of variations of side force coefficient ΔC_s (left) and yaw moment coefficient ΔC_{YM} (right) on a slip angle β . Measurement results of the current towing tank experiment with the one-fifth-scale simplified model are compared to the previous wind tunnel experiment (Okada, et al., 2014) with the real sedan-type vehicle. Aerodynamic characteristics of the real vehicle in horizontal motions was successfully simulated by the current towing tank experiment because the variations show a similar tendency and their gradients $\Delta C_s / \beta$ and $\Delta C_{YM} / \beta$ of the current experimental model are 1.4 times and 0.8 times those of the real vehicle, respectively.

せるヨーモーメントが発生している．このような発生流体力の傾向は，一様流中で迎角を与えられた翼型などの細長物体に作用する揚力およびピッチングモーメントと同じであり，実車風洞試験結果とも定性的に一致している．また，実車風洞試験との定量的比較においても，すべり角の変化に対する横力係数の傾斜が約 1.4 倍，ヨーモーメント係数の傾斜は 0.8 倍程度であり，一部境界条件や Reynolds 数条件が異なるものの同オーダの値を示している．このことから，本研究における 1/5 スケール車両モデルを用いた曳航水槽模型試験は水平面内運動するセダン型乗用車の空気力学的特性を模擬しており，本試験による車両空力特性の検討の妥当性が示されている．

4・2 旋回運動時に発生する流体力

4・2・1 発生流体力特性

本節では，定常円旋回運動時に発生する流体力について述べる．3・3 節に示したヨー回転運動と横すべり運動を伴う計 35 条件の曳航試験により計測された，横力係数およびヨーモーメント係数の直進状態 ($r' = v' = 0$) からの変化量 ΔC_S , ΔC_{YM} を図 8 に示す．図 8 は，横軸に無次元横すべり速度 v' をとり，旋回角速度 r' に応じた色分けをして計測値をプロットしたグラフである．また，同グラフ中には重回帰分析により求めた線形近似多項式に基づく ΔC_S , ΔC_{YM} の近似直線も併せて示した．計測結果の重回帰分析については 4・2・3 項において後述する．なお，3.2 節で述べたように $U \gg v$ ，すなわち $1 \gg v'$ であれば， $\beta \approx v'$ という近似が成り立つので，同グラフの横軸は近似的にすべり角 β とみなすことができる．この近似は，以降の v' と発生流体力の関係に関する議論においても有効である．ただし，このときのすべり角の単位は，図 7 中のグラフに示した度ではなく，ラジアンであることに注意されたい．

図 8 のグラフが示すように， r' の値の正側への変化に伴って横力係数の値は正側へ，ヨーモーメント係数の値は負側へと，それぞれ変化している．これは自動車が左旋回 ($r' > 0$) することにより，左向きの横力と，旋回方向とは反対の右旋回向きに車両を回転させようとするヨーモーメントが作用することを意味する．また，すべての r' において，横すべり速度 v' に対する横力とヨーモーメントの変化は同じ傾向を示しており，これは $r' = 0$ の直進時と同じ傾向である．

Fig.8 Variations of side force and yaw moment coefficients ΔC_S and ΔC_{YM} depending on a combination of the yaw rate r' and side slip velocity v' . Dashed lines are the approximated linear function given by a multiple regression analysis, which is described in paragraph 4・2・3. With a positive change of r' , C_S and C_{YM} change to positive and negative sides, respectively. This fact means that the side force to the left side ($C_S > 0$) and the yaw moment opposed to the yaw rotation ($C_{YM} < 0$) act to the vehicle turning left ($r' > 0$). At all r' conditions, dependencies of C_S and C_{YM} on the lateral velocity show a similar tendency.

4・2・2 旋回運動に伴う流体力の発生要因分析

前項で述べた旋回運動時の自動車に作用する流体力について、その発生要因を考察し、それぞれの流体力特性を踏まえた上で、図8の曳航試験結果を分析する。考察にあたっては、船舶運動力学における流体力についての知見(元良, 1955)を参考とした。

旋回運動時の車両に横力を発生させる要因としては、風洞実験等で既に検討されているすべり運動の影響の他に、旋回運動特有の要因として、車両の自転運動に伴う車両周りの循環の発生と、車両重心の円弧運動に伴う向心方向加速運動が考えられる。また、車両の自転運動によって車両局所における周囲流体との相対速度が変化するので、それに伴って車両局所に作用する非定常渦放出に伴う流体力と摩擦による流体力（以降、それぞれを渦抵抗力、摩擦力と称する）も変化し、それらの流体力の車両横方向成分も横力を生じると考えられる。そこで、以上3つの横力発生要因について考察する。

自転運動によって生じる循環 Γ はマグヌス効果と類似の効果を生じ、地面に平行、かつ車両重心から見た一様流に対して垂直方向に力を発生するので、この分力が横力を生む。例えば図2(b)の左旋回時は y 軸正の車両左向きに横力が発生する。ポテンシャル理論からの類推からこの力は角速度 r に比例し、また回転物体の物体表面積と回転軸周りの物体の代表長さとも比例関係にあると考えられる。したがって車両正面投影面積と車長を用いれば、自転運動に伴う横力 F_{yM} は

$$F_{yM} = \rho U \Gamma = C_F A L \rho U r \quad (4)$$

と見積もられる。 C_F は車両形状に依存し、特異な場合を除いて正值をとると考えられる定数である。

一方、流体中で物体が加速運動をする場合には、周囲流体を引き連れて加速する必要があるため、その反作用として加速運動を妨げる方向に流体力が作用する、いわゆる付加質量効果が生じる。定常旋回運動では車両は向心方向に加速運動しているため、付加質量効果によって旋回運動の遠心力方向に流体力が生じ、その分力として横力が発生する。旋回運動する物体の横方向に作用する遠心力成分 F_{yA} は、物体前後方向の加速運動により生じる付加質量 m_x に依存する(元良, 1955)ことが知られている。また、 m_x は物体形状に依存し、物体体積と周囲流体密度にも比例するので、物体体積を車両正面投影面積と車長の積で評価すると、 F_{yA} は

$$F_{yA} = -m_x U r = -C_{AM} \rho A L U r \quad (5)$$

と見積もられる。ここで、 C_A もまた、車両形状に依存し、正值をとる定数である。

最後に、車両の自転運動に伴う車両局所の相対流速変化によって生じる渦抵抗力および摩擦力の変化の影響について考察する。ここでは、一般的な自動車の走行条件は高 Reynolds 数流れであることを考慮し、摩擦力の影響は渦抵抗力に比べて微小であるものとして、渦抵抗力についてのみ考察することとする。物体局所に生じる渦抵抗力が物体の影響を排した局所相対流速によって決定されるものと仮定した考察(元良, 1955)の、 $r \ll 1$ における評価では、自転運動に伴う渦抵抗力変化が生じる横力 F_{yV} は、 L 、 u 、および r に比例することが示されている。そこで、 $u \approx U$ と近似し、同横力が物体表面積と周囲流体密度とも比例関係にあるとすれば、 F_{yV} は

$$F_{yV} = C_{FV} \rho A L U r \quad (6)$$

と見積もられる。ここで、 C_{FV} は車両局所からの渦放出による抵抗特性を表す係数である。なお、自転運動による横方向の相対流速変化は、自転運動の中心となる重心点の前後においてその向きが逆転し、それに伴う渦抵抗力も重心点の前後で互いに打ち消しあうので、 C_{FV} の値とその正負は車両形状、特にその重心軸に対する非対称性に依存するものと考えられる。また、その大きさに関して、回転抵抗計測用の模型船舶(赤崎他, 1942)に対する見積もり(元良, 1955)では、船首および船尾部が生じる自転運動に伴う渦抵抗力の大きさが、自転運動の循環によって生じる横力の2～5割程度と見積もられている。自動車においても、重心の前側と後側でそれぞれ同オーダーの横力が逆向きに発生するとすれば、両者の差分となる渦抵抗力による横力の大きさは、循環により生じる横力に比べて充分小さくなり、 $C_F \gg |C_{FV}|$ であると考えられる。

以上より, F_{yM} , F_{yA} および F_{yV} の合力 F_{yT} は, 式(4)~(6)をそれぞれ足し合わせて

$$F_{yT} = F_{yM} + F_{yA} + F_{yV} = (C_{\Gamma} - C_{AM} + C_{FV})\rho ALUr \approx (C_{\Gamma} - C_{AM})\rho ALUr \quad (7)$$

となり, これらの効果を合わせた横力の作用方向は, 最終的に $(C_{\Gamma} - C_{AM} + C_{FV})$ の符号, 近似的には $(C_{\Gamma} - C_{AM})$ の符号によって決定されることがわかる. 従って, 各係数の値が車両形状のみで決まるものであれば, この横力は旋回方向に対して常に一定の向きに作用する. また, 上記の要因に基づいて評価される横力係数 C_{SE} は, 式(7)の F_{yT} を無次元化して,

$$C_{SE} \approx (C_{\Gamma} - C_{AM})\rho ALUr / \left(\frac{1}{2} A \rho U^2 \right) = 2(C_{\Gamma} - C_{AM})r' \quad (8)$$

となるので, ここまでに述べた仮定に基づけば, 横力係数は無次元旋回角速度 r' に比例するものと考えられる.

以上の議論を基に, 前項に示した横力の計測結果を分析する. 図 8 (a)において, r' に対する C_S の変化の傾向に注目すると, r' の値の正側への変化 (寒色のプロットから暖色のプロットへかけての変化) に伴って C_S の値も正側へと変化している. これは, 図 2(a)における反時計周りの回転角速度の発生に伴って y 軸正の方向の向心力が発生することを意味する. 従って, 先の仮定が成立する範囲内であれば, 対象車両モデル形状には旋回運動に伴う車両の回転運動に起因して, 常に向心方向の流体力が作用することとなる. また, r' に対する C_S の変化を式(8)の r' と C_{SE} との比例関係に対応付けると, 係数 $2(C_{\Gamma} - C_{AM})$ は正となり, $C_{\Gamma} > C_{AM}$ と考えられる. 即ち, 定常円旋回する自動車に作用する横力については, ここで議論した 3 要因のうち, 車両の自転運動に伴う循環が発生する横力が卓越しているものと考えられる. ただし, C_{Γ} や C_{FV} の値は, 車両局所が生じる剥離流れの性状などによって変化し, 実際には r' や U に依存するものと考えられるので, これらの依存性については今後検討が必要である.

次に, 旋回運動する車両にヨーモーメントを発生する流体現象について考察する. ここでは, 先の横力に関する議論で述べた旋回運動特有の 3 つの流体力発生要因に注目し, それぞれに起因するヨーモーメントについて評価することとする.

自転運動に伴う循環の影響について, マグヌス効果と類似の効果によって発生する横力 F_{yM} は, 座標原点である車両重心回りにヨーモーメント

$$M_{zM} = F_{yM} x_M = C_{\Gamma} x_M AL\rho Ur \quad (9)$$

を生じる. ここで, x_M は循環の影響により発生するヨーモーメントがゼロとなる車両前後軸上の点の x 座標である. 以降この点を単に, 圧力中心と称することとする. 一方, 付加質量効果に関しては, 定常円旋回運動では角加速度が 0 であるので付加慣性モーメントについて考慮する必要は無い. 従って, 同効果により発生するヨーモーメントは, 先の自転運動に伴う循環の影響と同様, 付加質量効果による遠心力方向の流体力の分力として生じる横力 F_{yA} とその圧力中心の x 座標 x_A によって

$$M_{zA} = F_{yA} x_A = -C_{AM} x_A \rho ALUr \quad (10)$$

と表すことができる. 以上の 2 つの発生要因によるヨーモーメントが作用する向きについては, 横力 F_{yM} , F_{yA} とは異なり, x_M , x_A , 即ち各々の圧力中心位置と重心との前後位置関係が物体形状に依存すると考えられるため, その評価は困難である. これに対して車両の自転運動に伴う車両局所の相対流速変化で生じる渦抵抗変化の影響については, 当然ながら車両局所の相対流速が自転速度の逆向きに変化するので, その渦抵抗力も自転運動と逆向きのヨーモーメントを発生すると考えられる. 横力と同様に $r' \ll 1$ における評価(元良, 1955)を参考にすると, そのヨーモーメント M_{zV} は $L^2 u$, および r に比例するものとされている. ここでは, 車両面積と周囲流体密度の影響も考慮して, M_{zV} を

$$M_{zV} = -C_{MV} \rho A L^2 U r \quad (11)$$

と評価することとする。ここで、 C_{MV} は車両からの渦放出による抵抗特性を表す係数であり、車両形状に依存するものと考えられる。自転運動に伴う局所相対流速変化は常にその運動に対して反対向きであることを考慮すると、 C_{MV} は正値を取るものと考えられる。

ここまで議論した3つの発生要因によるヨーモーメント M_{zM} , M_{zA} , M_{zV} の和 M_{zT} は、式(9)~(11)より

$$M_{zT} = M_{zM} + M_{zA} + M_{zV} = (C_{\Gamma} x_M - C_{AM} x_A - C_{MV} L) \rho A L U r \quad (12)$$

となり、これらの効果を合わせたヨーモーメントの作用方向は、最終的に $(C_{\Gamma} x_M - C_{AM} x_A + C_{MV} L)$ の符号により決定されることがわかる。従って、各係数の値が車両形状のみで決まり、かつ循環と付加質量による影響で生じるヨーモーメントの圧力中心位置についても車両形状のみに依存すると仮定すれば、定常円旋回時に生じるヨーモーメントは、旋回方向に対して常に一定の向きに作用することとなる。また、上記の3要因に基づいて評価されるヨーモーメント係数 C_{YME} は、式(12)の M_{zT} を無次元化して、

$$C_{YM,E} = (C_{\Gamma} x_M - C_{AM} x_A - C_{MV} L) \rho A L U r / \left(\frac{1}{2} A \rho U^2 L_w \right) = \frac{2(C_{\Gamma} x_M - C_{AM} x_A - C_{MV} L)}{L_w} r', \quad (13)$$

となるので、上記の近似評価に基づけば、ヨーモーメント係数も無次元旋回角速度 r' に比例すると考えられる。

以上の議論を基に、前項に示したヨーモーメントの計測結果を分析する。横力の議論と同様に、図8(b)において r' に対する C_{YM} の変化の傾向に注目すると、 r' の値の正側への変化に伴い C_{YM} は負側へと変化している。これは、図2(a)における反時計回りの回転角速度の発生に伴って時計回りのヨーモーメントが発生することを意味している。さらに、各係数と圧力中心位置が車両形状のみに依存するという先の仮定が成り立つ範囲であれば、対象車両モデル形状には、旋回運動に伴う車両の回転運動に起因して、常にその自転運動を妨げる向きのヨーモーメントが作用することとなる。また、 r' に対する C_{YM} の変化を式(13)の r' と C_{YME} との比例関係に対応付けると、 $(C_{\Gamma} x_M - C_{AM} x_A - C_{MV} L) < 0$ となるが、車両形状とその発生メカニズムから圧力中心位置 x_M, x_A は車両上に存在して $|x_M|, |x_A| < L$ と考えられること、横力に関する議論から $|C_{\Gamma}| > |C_{AM}|$ であったこと、同じく C_{MV} については C_{Γ} と同オーダーと考えられること、などを考慮すると、その要因としては $-C_{MV} L$ の寄与が大きいと考えられる。即ち、ヨーモーメントの発生においては、ここで議論した3要因のうち自転運動に伴って生じる渦抵抗力の影響が卓越しているものと考えられるが、詳細については前後端形状の異なる車両を用いた更なる検討が必要である。

4・2・3 重回帰分析を用いた旋回運動影響の定量評価

前項における議論では、旋回運動特有のヨー回転運動に伴って生じる C_S と C_{YM} について、近似的には r' に比例すると考えられることを示した。また、横すべり運動に伴う C_S , C_{YM} について、 β との比例関係を仮定することはしばしば用いられる近似手法であり、これは $v' \ll 1$ においてそれらと v' との比例関係を仮定することと同義である。そこでここではまずヨー回転運動と横すべり運動の相互作用については無視して、 C_S , C_{YM} が v' と r' の線形多項式

$$C_S(v', r') = Y'_v v' + Y'_r r' + C_{S,0} \quad (14)$$

$$C_{YM}(v', r') = N'_v v' + N'_r r' + C_{YM,0} \quad (15)$$

によって近似評価できるものと仮定し、その有用性を4・2・1項の実験結果より実証する。これにより、両運動により生じる横力とヨーモーメントの発生量と運動パラメータとの関係について、重回帰分析を用いて定量的に

評価することができる。なお、式(14), (15)中の Y_v, Y_r, N_v, N_r は、それぞれ C_S と C_{YM} の v と r に対する 1 次の微係数であり、横力とヨーモーメントの v と r に対する微係数を次式のように無次元化した無次元係数である。

$$Y'_v = \left(\frac{\partial F_y}{\partial v} \right) / \left(\frac{1}{2} \rho U A \right), \quad Y'_r = \left(\frac{\partial F_y}{\partial r} \right) / \left(\frac{1}{2} \rho U A L \right) \quad (16)$$

$$N'_v = \left(\frac{\partial M_z}{\partial v} \right) / \left(\frac{1}{2} \rho U A L_w \right), \quad N'_r = \left(\frac{\partial M_z}{\partial r} \right) / \left(\frac{1}{2} \rho U A L L_w \right) \quad (17)$$

4・2・1 項に示した 35 条件の曳航試験結果を用いて、重回帰分析を行って得られた各係数 Y'_r, Y'_v, N'_r, N'_v と定数項 C_{S0}, C_{YM0} の値を表 2 に示す。表中の各係数からも、4・1 節および 4・1・1 項において述べた、定常円旋回する自動車において、車両の横すべり運動とヨー回転運動に伴って生じる横力とヨーモーメントの特性を確認することができる。

横力に関する微係数値より、車体のヨー回転角速度 r に対する横力係数の勾配は正である。これは、左方向へ旋回する ($r > 0$) 自動車に対して、ヨー回転運動の効果により、 y 軸正方向の左向き力、即ち向心力が発生することを意味する。また、横すべり速度 v に対しては横力係数の勾配が負である。これは、 y 軸正方向である左向きの横すべりを伴って左斜め前方へと進行する自動車に対し、 y 軸負方向である右向きの横力、即ち横すべりを抑制する向きの力が発生することを示している。また、3・2 節で述べたとおり、一定速以上の高速域で定常円旋回する自動車においては、 r と v の符号が異なるので、車両のヨー回転運動と横すべり運動が生じる横力は同符号となって、両者は同じ向きに作用する。

ヨーモーメントについては、車体のヨー回転角速度 r に対するヨーモーメント係数の勾配が負である。これは同じく左方向へ旋回運動する自動車に対して、ヨー回転運動の効果により、 z 軸周り回転の負方向となる右旋回方向のヨーモーメント、即ち旋回に伴う自転運動を抑制する向きのモーメントが発生することを意味する。また、横すべり速度 v に対するヨーモーメント係数の勾配も負である。これは、 y 軸正方向である左向きの横すべりを伴って進行する自動車に対し、右旋回方向のヨーモーメント、即ち横すべりが増大する方向へと車両姿勢を変化させるヨーモーメントが発生することを示している。ヨーモーメントについては、一定速以上の高速域で定常円旋回する自動車においては異符号の r と v が生じると、車両のヨー回転運動と横すべり運動が生じるヨーモーメントも異符号となって、互いに打ち消しあう方向へと作用する。

本重回帰分析における重決定係数は、 C_S, C_{YM} についてそれぞれ 0.976, 0.962 であり、各比例係数の標準誤差は Y'_r が 7.5%, Y'_v が 2.8%, N'_r が 4.9%, N'_v が 6.0% であった。このことから、式(14), (15)による近似表現と重回帰分析により示された各係数値が、本研究における条件範囲内での r, v による C_S, C_{YM} への影響をよく表していることがわかる。このことは図 8 に示したグラフからも明らかである。

Table 2 Partial derivatives of C_S and C_{YM} with respect to r and v estimated by a multiple linear regression analysis based on Eqs. (14) and (15). These derivatives quantitatively show the dependencies of C_S and C_{YM} on r and v shown in Fig. 8. The approximation equations describe the dependencies well because the coefficients of determination for the multiple linear regression analyses of C_S and C_{YM} are 0.976 and 0.962, respectively.

C_S			C_{YM}		
Y'_r	Y'_v	C_{S0}	N'_r	N'_v	C_{YM0}
0.74	-2.9	0.0404	-0.40	-0.49	-0.00035

4・2・4 高速操舵走行条件における発生流体力の準定常的評価

前項で得られた、ヨー回転運動および横すべり運動に伴って生じる、横力およびヨーモーメント係数の変化を表す線形近似多項式を用いて、高速操舵走行する実車に発生する流体力変化について評価を試みる。なお、ここで用いる線形近似多項式は、本研究で実施した曳航水槽実験による定常旋回運動に伴って発生する定常流体力から導かれたものであるため、その評価は準定常的であることに注意されたい。実車による高速蛇行走行試験(岡田他, 2014)において計測された車両運動パラメータ r' , v' は、いずれも横変位が最大となる蛇行軌跡の頂点で最大最小値をとるが、 r' と v' は逆位相であり、蛇行軌跡の頂点では (r', v') は左旋回側で $(0.0076, -0.0042)$ 、右旋回側で $(-0.0076, 0.0042)$ の組合せであった。そこで、表2の係数値と、蛇行軌跡の左旋回側の頂点におけるパラメータの値 $(r', v') = (0.0076, -0.0042)$ を、式(14), (15)へ代入し、実走行状態において準定常的に発生する旋回と横すべりに伴う横力とヨーモーメント係数の推定変化量を評価した。その結果を表3に示す。

表より、横力については、横すべり運動に伴う横力係数変化 $Y_v v'$ に対して、ヨー回転運動に伴う横力係数変化 $Y_r r'$ は約0.5倍となっており、蛇行運動の最大横変位の位置では、横すべり運動による横力への影響が旋回運動による影響を上回っていることが予想される。また、両運動は同方向に横力を発生している。しかし、発生横力の定量評価においては、回転運動に伴う横力係数の変化も無視できない大きさを有することが示されている。一方、ヨーモーメントについては、ヨー回転運動に伴う係数変化 $N_r r'$ が横すべり運動に伴う係数変化 $N_v v'$ に対して約1.5倍であり、旋回運動の寄与が横すべり運動のそれを上回っている。加えて、両成分の符号が異なることから両者は互いに逆方向にヨーモーメントを生じており、その効果を打ち消し合うことがわかる。このことは、モーメントが生じる向きを検討するような定性的評価においても、ヨー回転運動による寄与を考慮する必要があることを示している。

Table 3 Variation of C_S and C_{YM} in a typical on-road condition estimated by Eqs. (14) and (15). Values of the parameters $(r', v') = (0.0076, -0.0042)$, which are measured at the left-turning peak of the trajectory in the on-road measurement (Okada, et al., 2014), are substituted in the equations. The effects of yaw rotation described as $Y_r r'$ and $N_r r'$ have considerable magnitudes. This indicates a need to consider these effects in the consideration of vehicle aerodynamics in steady-state cornering.

ΔC_S		ΔC_{YM}	
$Y_r r'$	$Y_v v'$	$N_r r'$	$N_v v'$
0.0056	0.0121	-0.0030	0.0020

5. 結 言

曳航水槽を用いた検力試験を行って、定常円旋回時の自動車に作用する空気力とその発生メカニズムを調査した。定常円旋回時の自動車の運動を、車両重心を原点とする自動車固定の座標系で定義された車両のヨー回転運動と横すべり運動の2つに分解して整理し、それぞれの運動に伴って発生する流体力について考察した。得られた結果に対して、発生流体力がヨー回転角速度と横すべり速度との線形和で表現できるものと仮定し、その線形係数を重回帰分析により求めた。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 本研究における計測範囲では、発生流体力に対する車体のヨー回転運動と横すべり運動の影響が、両者の線形の重ね合わせで説明できることが明らかとなった。

(2) 横力については、図9に示すように、車両のヨー回転運動により円弧軌道に対する向心力が、横すべり運動により横すべりを抑制する向きの力が、それぞれ発生する。一般的な自動車の走行条件では、車両重心の横すべりは旋回円に対して外向きである(即ち、車両は旋回円の内側を向いている)ことが多く、このことを考慮すると、横すべり運動に伴って生じる空気力も向心方向に作用すると考えられる。

(3) ヨーモーメントについては、図9に示すように、車体のヨー回転運動によりその回転を抑制する向きのモーメントが、横すべり運動により横すべりを増大する向きに車体の姿勢を変化させるモーメントが、それぞれ発

生する。したがって一般的な自動車の走行条件では、両モーメントは互いに打ち消しあう方向に作用すると考えられる。

(4) セダン型乗用車による蛇行運動試験で観測された車両の回転角速度と横速度から、準定常的な空気力を予測評価したところ、横変位が最大となる場所での空気力は、横力、ヨーモーメント共にヨー回転運動の影響と横すべり運動の影響は同オーダーであった。横力については、回転運動の影響が横すべり運動の影響の5割程度の大きさを示し、ヨーモーメントについては、ヨー回転運動の影響が横すべり運動の影響の1.5倍程度の大きさを示した。

以上の結果は、定常円旋回時の自動車に作用する空気力を考えるときには、風洞実験で一般に検討されている車体の横すべり運動が生じる流体力のみならず、曳航実験や数値シミュレーションなどを用いて、車体のヨー回転運動によって生じる流体力を考慮することが重要であることを示唆している。本論文では一般的なセダン型乗用車を対象に、それらの流体力特性を明らかにしたが、今後は車型や車両局所の形状などが同流体力特性に与える影響について調査し、その影響について定量的に把握する必要がある。

Fig.9 Schematic views of the fluid-dynamic side force and yaw moment acting on a road vehicle in steady-state cornering. The effect of the yaw rotational motion aerodynamically generates a centripetal force of the circular motion and a moment suppressing the rotation. The effect of the sideslip motion generates a force suppressing the slip motion and a moment enhancing the vehicle's slip angle.

謝 辞

本研究は以下の支援により行われた：文部科学省高性能汎用計算機高度利用事業「HPCI 戦略プログラム」分野 4 次世代ものづくり（「自動車用次世代熱・空力設計システムの開発」における基礎検証課題として）、科研費基盤研究（B）No. 26289033（実用ブラフボディの空力特性解明）、科研費基盤研究（C）No. 26420115（ブラフボディの運動に伴う流体力発生メカニズムの考察）。また、広島大学大学院工学研究院の安川宏紀教授と平田法隆助教には、曳航水槽試験装置の使用にあたって多くの貴重な助言を頂いた。広島大学大学院工学研究科の藤本創氏（現 三菱重工業株式会社）には、曳航試験の実施にあたり多大な協力を頂いた。ここに記して、各位への謝意を表する。

文 献

- 安倍正人，自動車の運動と制御：車両運動力学の理論形成と応用 第2版(2012)，東京電機大学出版局，p.72.
赤崎繁，重光藤，渡邊恵弘，船の旋回中の見掛けの水の質量に就て(第1報)，造船協会会報，Vol.69 (1942)，pp.115-140.
Cheng, S.Y., Tsubokura, M., Okada, Y., Nouzawa, T., Nakashima, T. and Doh, D.H., Aerodynamic stability of road vehicles in dynamic pitching motion, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.122 (2013), pp.146-156.
ISO13674-1, Road vehicles - Test method for the quantification of on-centre handling - Part 1: Weave test (2010).
金井誠，駒徹郎，青木清平，宮田秀明，山下高明，地面効果を受ける進行物体に働く流体力，日本造船学会論文集 Vol.170 (1991)，pp. 73-81.
河上充佳，佐藤範和，Aschwandten Peter，加藤由博，中川雅樹，小野英一，動的空気解析に基づく簡易車両模型の非定常空気力モデル，日本機械学会論文集 C 編，Vol.76, No.768 (2010)，pp.2006-2015.
元良誠三，航路安定性に就て，造船協会会報，Vol.77 (1955)，pp.69-90.

- 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.
- 岡田義浩, 農沢隆秀, 坪倉誠, 中島卓司, 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, 日本機械学会論文集, Vol.80, No.809 (2014), DOI : 10.1299/transjsme.2014smm0009.
- 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.
- 佐藤範和, 河上充佳, 加藤由博, 稲垣昌英, 堀之内成明, ALE 手法を用いた運動する車両周りの非圧縮性 LES 解析 : 第3報, 上下運動する簡易車両模型の非定常空力解析, 日本機械学会論文集 B 編, Vol.76, No.770 (2010), pp.1515-1524.
- Theissen, P., Wojciak, J., Heuler, K., Demuth, R., Indinger, T. and Adams, N., Experimental investigation of unsteady vehicle aerodynamics under time-dependent flow conditions - Part 1, SAE Technical Paper, No.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 System, Vol.5, No.1 (2012), pp. 340-357.

References

- Abe, M., Automotive vehicle dynamics: theory and applications 2nd edition (2012), p.72, Tokyo Denki University Press (in Japanese).
- Akasaki, S., Shigemitsu, A. and Watanabe, Y., On the virtual water masses of ship while turning, Journal of Zosen Kiokai, Vol.69 (1942), pp.115-140 (in Japanese).
- Cheng, S.Y., Tsubokura, M., Okada, Y., Nouzawa, T., Nakashima, T. and Doh, D.H., Aerodynamic stability of road vehicles in dynamic pitching motion, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.122 (2013), pp.146-156.
- ISO13674-1, Road vehicles -Test method for the quantification of on-centre handling - Part 1: Weave test (2010).
- Kanai, M., Koma, T., Aoki, K., Miyata, H. and Yamasita, T., Hydrodynamical forces on a moving body in ground effect, Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol.170 (1991), pp.73-81 (in Japanese).
- Kawakami, M., Sato, N., Aschwanden P., Kato, Y., Nakagawa, M. and Ono, E., A modeling of unsteady aerodynamic forces based on the aerodynamic analyses around a simplified car model in periodic motions, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Series C, Vol.76, No.768 (2010), pp.2006-2015 (in Japanese).
- Motora, S., Course stability of ships, Journal of Zosen Kiokai, Vol.77 (1955), pp. 69-90 (in Japanese).
- 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 Japan Society of Mechanical Engineers. Series B, Vol. 75, No.757 (2009), pp. 1807-1813 (in Japanese).
- Okada, Y., Nouzawa, T., Tsubokura, M. and Nakashima, T., Characteristics of unsteady flow around a vehicle affecting its high-speed stability during a dynamic steering action, Transactions of the JSME (in Japanese), Vol.80, No.809 (2014), DOI : 10.1299/transjsme.2014smm0009.
- 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).
- Sato, N., Kawakami, M., Kato, Y., Inagaki, M. and Horinouchi, N., LES analysis of incompressible flows around an automobile in motion using ALE method : 3rd report, unsteady aerodynamic analysis around a simplified car model in heave motion, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. Series B, Vol.76, No.770 (2010), pp.1515-1524 (in Japanese).
- Theissen, P., Wojciak, J., Heuler, K., Demuth, R., Indinger, T. and Adams, N., Experimental investigation of unsteady vehicle aerodynamics under time-dependent flow conditions - Part 1, SAE Technical Paper, No.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 System, Vol.5, No.1 (2012), pp. 340-357.