

学位論文 博士（工学）

路面入力で発生する  
車両運動と非定常空気力の連成

**Coupling between vehicle behavior and  
unsteady aerodynamics in road input**

名古屋大学 大学院工学研究科 航空宇宙工学専攻

前田 和宏

Department of Aerospace Engineering,  
Graduate School of Engineering, Nagoya University

**Kazuhiro MAEDA**

令和3年 7月

**Jun 2021**

# 目次

路面入力で発生する 車両運動と非定常空気力の連成 .....	1
目次 .....	2
Figure 一覧.....	5
Table 一覧.....	10
記号一覧.....	11
1. 序論 .....	16
1.1. 研究背景.....	16
1.1.1. 自動車の空力性能向上における研究課題.....	16
1.1.2. 空気力による走行安定性向上への先行研究 .....	17
1.1.3. 非定常空気力の関する先行研究.....	19
1.1.4. 運動で発生する非定常空気力に関する先行研究.....	20
1.2. 本研究の目的, 概要.....	23
2. 運動で発生する非定常空気力の計測と定式化 .....	25
2.1. 実験装置と解析手順 .....	25
2.1.1. 模型風洞加振試験の概要 .....	25
2.1.2. 実験模型 .....	26
2.1.3. 加振・荷重計測装置 .....	27
2.1.4. 空気力定式化の考慮範囲 .....	28
2.1.5. 空気力モデル定義 .....	29
2.1.6. 空気力の定式化手順 .....	31
2.2. 計測結果と応答関数算出.....	33
2.2.1. 模型加振時の流れと荷重応答.....	33
2.2.2. 加振時荷重の周波数応答 .....	37

2.2.3.	空気力の周波数応答 .....	39
2.2.4.	空気力応答の無次元化 .....	40
2.2.5.	空気力の応答関数化 .....	41
2.3.	形状・運動方向による非定常空気力の変化 .....	43
2.3.1.	ピッチ運動時空気力応答の形状比較 .....	43
2.3.2.	上下運動時空気力応答の形状比較 .....	45
2.3.3.	空気力応答の定式化まとめ .....	48
2.4.	空気力応答関数の検証 .....	50
2.5.	まとめ .....	53
3.	路面入力時の車両運動に与える非定常空気力の影響解析 .....	54
3.1.	非定常空気力を考慮した運動応答関数の導出 .....	54
3.1.1.	空気力を考慮した路面入力時の運動方程式 .....	54
3.1.2.	非定常空気力の入力 .....	56
3.1.3.	路面入力時の運動応答関数 .....	57
3.2.	運動応答関数での比較 .....	58
3.2.1.	比較形状ケース .....	58
3.2.2.	実車両の非定常空気力の算出 .....	58
3.2.3.	実車両の運動応答関数の算出 .....	60
3.3.	運動挙動シミュレーションでの比較 .....	64
3.3.1.	ステップ路面応答での運動挙動比較 .....	64
3.3.2.	一定周期路面での運動挙動比較 .....	66
3.4.	まとめ .....	68
4.	解析方法の検証と考察 .....	70
4.1.	実走行運動計測による検証 .....	70
4.1.1.	実走行での車両運動計測 .....	70

4.1.2.	運動計測結果.....	71
4.1.3.	解析による予測結果との比較.....	73
4.2.	ドライバー評価との対応.....	75
4.2.1.	ドライバー評価結果.....	75
4.2.2.	車両運動とドライバー評価の対応.....	76
4.3.	車両諸元に対する影響度解析.....	77
4.3.1.	空気力係数と車両諸元による特性値の比較方法.....	77
4.3.2.	空気力係数の影響割合の算出.....	79
4.4.	流れと空気力の対応.....	81
4.4.1.	模型加振時の流速応答の計測.....	81
4.4.2.	流速応答の計測結果.....	81
4.4.3.	空気力係数と流れ応答の関係.....	83
4.5.	まとめ.....	85
5.	結論.....	87
5.1.	全体まとめ.....	87
5.2.	今後への展開.....	90
References	.....	91
謝辞	.....	95
発表論文	.....	96

# Figure 一覽

FIG. 1.1 Aerodynamic influences to the vehicle performances due to the flow around the vehicle body (based on Sumitani, 2007 and Maeda, 2011).....	16
FIG. 1.2 Recently aerodynamic devices for improving the vehicle dynamic stability .....	17
FIG. 1.3 Classification of aerodynamic forces in running condition and focus point of each aerodynamic force to the vehicle dynamic behavior (based on Maeda, 2011). .....	22
FIG. 2.1 Outline on the measurement of aerodynamic forces caused by pitch and heave motion with the excitation tests in the scale-model wind tunnel. ....	25
FIG. 2.2 Tested 1/4 scale vehicle model with wheel-houses, the protrusion for comparing case and model support strut. The steady-state aerodynamic coefficients are shown in comparing two cases. ....	26
FIG. 2.3 Excitation system including the force measurement system, with eccentric circulate motion motors, load cells, excitation bases, and support springs. ....	27
FIG. 2.4 Definition of aerodynamic forces of front and rear caused by pitch and heave motion in this study .....	28
FIG. 2.5 Process of extracting the unsteady aerodynamic forces and formulating to aerodynamic response functions by measured load data in excitation tests.....	32
FIG. 2.6 Flow visualizations of smoke with pitch excitation of 1.6 Hz at 20 m/s, without and with the roof protrusion.....	34
FIG. 2.7 Definition of the variables at 1/4model excitation in wind tunnel. ....	35
FIG. 2.8 Confirming no-effect of aerodynamic added mass by comparing calculated value to measured load value in pitch excitation test in 1.6 Hz at 0 m/s.....	35
FIG. 2.9 Experimental results of the front and rear measured forces ( $R_f, R_r$ ) with pitch excitation ( $\theta_x$ ) of 1.6 Hz, at 0 and 20 m/s, in comparing models without and with the protrusion. ....	36
FIG. 2.10 Frequency responses of measured forces ( $R_f, R_r$ ) by pitch angle ( $\theta_x$ ) in pitch excitation of 0.2– 2.0 Hz at 0, 10, 20 m/s, on the model without the protrusion.....	37

FIG. 2.11	Frequency responses of aero-forces ( $A_f, A_r$ ) by pitch angle ( $\theta_x$ ) in pitch excitation of 0.2–2.0 Hz at 10 and 20 m/s, on the model without the protrusion.....	39
FIG. 2.12	Normalized frequency responses of aero-forces ( $A_f, A_r$ ) by pitch angle ( $\theta_x$ ) in pitch excitation of 0.2–2.0 Hz at 10 and 20 m/s, on the model without the protrusion.....	40
FIG. 2.13	Normalized frequency response functions of aero-forces ( $A_f, A_r$ ) by pitch angle ( $\theta_x$ ) in pitch excitation of 0.2–2.0 Hz at 10, 15, 20 and 25 m/s, on the model without the protrusion. ....	41
FIG. 2.14	Normalized response functions of aero forces ( $A_f, A_r$ ) by pitch angle ( $\theta_x$ ) in pitch excitation of 0.2–2.0 Hz, at 10 and 20 m/s, on the model with the protrusion.....	43
FIG. 2.15	Normalized identified response functions of aero forces by pitch and heave motion, in comparing models without and with the protrusion. ....	44
FIG. 2.16	Normalized response functions of aero forces ( $A_f, A_r$ ) by heave displacement at wheelbase center ( $z_x^*$ ) in heave excitation of 0.2–2.0 Hz, at 10 and 20 m/s, in comparing models without and with the protrusion.....	45
FIG. 2.17	Consideration about the flow response around the vehicle in excitation of heave and pitch.	46
FIG. 2.18	Normalized identified response functions of aero forces by pitch and heave motion, in comparing models without and with the protrusion. ....	47
FIG. 2.19	Definition of the aero-coefficients of aero-inerter, aero-damping, and aero-spring by pitch and heave motion. ....	51
FIG. 2.20	Comparison between experimental measured forces and that by simulation results of the front and rear at 0 m/s and 20 m/s on the model without the protrusion, in an excitation mode when the rear heave displacement has the delay of 90 degrees to the front heave displacement at 1.6 Hz and 2.5mm amplitude. (Single-side amplitude values of forces are shown in figures.).....	51
FIG. 3.1	Definition of variables at the vehicle motion model of the pitch and heave motions with the vehicle suspension and unsteady aerodynamic forces.....	54
FIG. 3.2	Tested vehicle shapes, and steady-state aerodynamic coefficients in comparing models without and with the rectangular protrusion of 40 mm × 40 mm on the front roof end. ....	58

FIG. 3.3 Response functions of aerodynamic forces to pitch motion at 60 km/h on the real vehicle without and with the protrusion..... 59

FIG. 3.4 Response functions of the aerodynamic force by heave motion at 60 km/h on the real vehicle without and with the protrusion..... 59

FIG. 3.5 Transfer functions of the vehicle motion response ( $\theta_x, z_x$ ) in the road input considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect..... 60

FIG. 3.6 Transfer functions of the vehicle motion response ( $\theta_x, z_x$ ) in the road input considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect (Scoped from FIG. 3.5). ..... 61

FIG. 3.7 Transfer functions of the vehicle motion response ( $z_{xf}, z_{xr}$ ) in the road input considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect(Scoped from FIG. 3.7). ..... 62

FIG. 3.8 Transfer functions of the vehicle motion response ( $z_{xf}, z_{xr}$ ) in the road input considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect..... 62

FIG. 3.9 Simulation results of the vehicle motions with the unsteady aerodynamic forces on a 20 mm step response at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect. .... 64

FIG. 3.10 Simulation results of the vehicle motions with the unsteady aerodynamic forces on a 20 mm step response at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect (Scoped from FIG. 3.9). ..... 65

FIG. 3.11 Simulation results of the vehicle motions with the unsteady aerodynamic forces on a 10 mm sine road response of 1.4 Hz at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect..... 66

FIG. 3.12	Simulation results of the vehicle motions with the unsteady aerodynamic forces on a 10 mm sine road response of 1.8 Hz at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect.....	67
FIG. 4.1	Tested vehicle and measurement sensors, configuration, and spectrum of the road irregularity in the proving ground at the actual running test. ....	70
FIG. 4.2	Measured vehicle motions in timeline at the real vehicle running test in the proving ground at 60 km/h over three measurement trials on the real vehicle without and with the protrusion. ....	71
FIG. 4.3	Measured vehicle motions in timeline at the real vehicle running test in the proving ground at 60 km/h over three measurement trials on the real vehicle without and with the protrusion (Scoped from FIG. 4.2).....	72
FIG. 4.4	Measured vehicle motions in spectrums at the real vehicle running test in the proving ground at 60 km/h over three measurement trials on the real vehicle without and with the protrusion. ....	72
FIG. 4.5	Simulated vehicle motions in timeline by the simulation considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect.....	73
FIG. 4.6	Simulated vehicle motions in timeline by the simulation considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect (Scoped from FIG. 4.5).....	74
FIG. 4.7	Simulated vehicle motions in spectrums by the simulation considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect. ....	74
FIG. 4.8	Subjective evaluation results at the irregularity road in the proving ground at the actual running test. ....	75
FIG. 4.9	Inverting definition of rear aerodynamic force due to pitch motion corresponding to the vehicle suspension and inertia force definition in pitch motion.....	77



FIG. 4.10	Rates of the unsteady aerodynamic coefficients to the equivalent vehicle specification factors (from vehicle mass, damping, and spring of suspension) at 60 km/h on the real vehicle without and with the protrusion.....	79
FIG. 4.11	Boundary layer average velocity and standard deviation in pitch excitation of 0.0–2.0 Hz at 20 m/s, on 1/4 model without and with the protrusion.....	81
FIG. 4.12	Spectrums of boundary layer velocity response in pitch excitation of 1.6 Hz at 20 m/s on 1/4 model without and with the protrusion.....	82
FIG. 4.13	Time-lines of boundary layer velocity in pitch excitation of 1.6 Hz at 20 m/s, at 0 mm and 10 mm, on 1/4 model without and with the protrusion.....	83
FIG. 4.14	Flow around the vehicle body that should be paid attention to, with considering from the effective unsteady aerodynamic coefficients .....	84
FIG. 5.1	Relations between driver feeling, motion response, aero-response and flow around the vehicle. ....	89

# Table 一覽

TABLE 1.1	Classification of the aerodynamic forces and effects on the vehicle performances (based on Maeda, 2011).	18
TABLE 2.1	Normalized identified response function coefficients of aero forces by pitch and heave motion for the model without and with the protrusion.	48

# 記号一覧

$A_f, A_r$	aerodynamic lift force at the front axle, and at the rear axle
$A_f^+, A_r^+$	aero-lift force with air volume added mass at the front axle, and at the rear axle ( $A_f^+ = A_f + m_{adf}\ddot{z}_f$ , $A_r^+ = A_r + m_{adr}\ddot{z}_r$ )
$C_{Af}, C_{Ar}$	aero-coefficients of front and rear
$C_{Amf\theta}, C_{Amr\theta}, C_{Amfz}, C_{Amrz}$	coefficients of aerodynamic inertia of the axle based on motion with no dimension
$C_{Acf\theta}, C_{Acr\theta}, C_{Acfz}, C_{Acrz}$	coefficients of aerodynamic damping of the axle based on motion with no dimension
$C_{Akf\theta}, C_{Akr\theta}, C_{Akfz}, C_{Akrz}$	coefficients of aerodynamic spring of the axle based on motion with no dimension
$C_D$	drag coefficient of the vehicle
$C_{Lf}, C_{Lr}$	lift coefficients of the front and rear of the vehicle r
$c_f, c_r$	damping coefficient of suspension at front (for one wheel = 2400 Ns/m), and rear (= 1300 Ns/m)
$c_{f\theta}, c_{fz}, c_{r\theta}, c_{rz}$	coefficients of the aero-damping at the axle to motion with real dimensions
$c_{r\theta}^-$	coefficient of reversing the sign convention (only at the rear axle in pitch motion, = $-c_{r\theta}$ )
$D$	dynamic pressure of vehicle running velocity ( $= 1/2\rho U^2$ )
$f$	frequency
$f^*$	No dimensional frequency
$G_{Rf}, G_{Rr}$	gain of measured load in excitation test at front and rear
$G'_{Rf}, G'_{Rr}$	gain of measured load in excitation test at front and rear at 0 m/s
$G_{Af}, G_{Ar}$	gain of aerodynamic force in excitation test at front and rear

$k_f, k_r$	spring coefficients of suspension at front (for one wheel = 30900 N/m), and rear (= 28400 N/m)
$k_{f\theta}, k_{fz}, k_{r\theta}, k_{rz}$	coefficients of the aero-spring at the axle to motion with real dimensions
$k_{r\theta}^-$	coefficient of reversing the sign convention (only at the rear axle in pitch motion, = $-k_{r\theta}$ )
$L$	length of the vehicle (= 4.228 m)
$L_M$	length of the scale model (= 1.057 m)
$l_f, l_r$	length from the gravity center to the front axle (= 1.050 m), and to the rear axle (= 1.590 m)
$l_{wb}$	length of the wheel base (= 2.600 m)
$l_{Mwb}$	length of the wheel base of scale model (= 0.650 m)
$m$	body mass (= 1376 kg)
$m_{adf}, m_{adr}$	air volume added mass of front and rear
$m_{Mf}, m_{Mr}$	scale model inertial mass of front and rear
$m_f, m_r$	body mass of the front axle ( $=m \cdot l_r/l_{wb}= 847$ kg), and of the rear axle ( $=m \cdot l_f/l_{wb}= 529$ kg)
$m_{f\theta}, m_{fz}, m_{r\theta}, m_{rz}$	coefficients of the aero-inertia at the axle to motion with real dimensions
$m_{r\theta}^-$	coefficient of reversing the sign convention (only at the rear axle in pitch motion, = $-m_{r\theta}$ )
$R_f, R_r$	excitation force at the front axle, and at the rear axle
$R_f', R_r'$	excitation force at the front axle, and at the rear axle at wind velocity of 0 m/s
$R_f'', R_r''$	reproduced excitation forces at the front axle, and at the rear axle
$S$	frontal projected area of the vehicle (= 2.208 m <sup>2</sup> )
$S_M$	frontal projected area of the scale model (= 0.138 m <sup>2</sup> )

$S_f, S_r$	suspension force at the front axle, and at the rear axle
$T_{rz}$	first-order delay occurring for aerodynamic forces according to the heave motion with no dimension (only at the rear axle)
$U$	wind velocity
$z_b$	body displacement at the wheel-base center ( = $(z_{bf} + z_{br})/2$ )
$z_{bf}, z_{br}$	body displacement at the front axle, and at the rear axle
$z_{rd}$	road displacement at the wheel-base center ( = $(z_{rdf} + z_{rdr})/2$ )
$z_{rdf}, z_{rdr}$	road displacement at the front axle, and at the rear axle
$z_x$	body height to the road surface at the wheel-base center ( = $z_b - z_{rd}$ )
$z_{xf}, z_{xr}$	body height to the road surface at the front axle, and at the rear axle
$z_x^*, z_{xf}^*, z_{xr}^*$	No dimensional heave displacement, no dimensional front height and rear height of the vehicle
$\theta_b$	pitch angle of vehicle body ( = $(z_{bf} - z_{br})/l_{wb}$ )
$\theta_{rd}$	pitch angle of the road ( = $(z_{rdf} - z_{rdr})/l_{wb}$ )
$\theta_x$	body angle to the road surface at the wheel-base center ( = $\theta_b - \theta_{rd}$ )
$\rho$	air density (= 1.2 kg/m <sup>3</sup> )
$\tau_{rz}$	time constant of the rear axle at the heave motion with real dimensions ( $\tau_{rz} = T_{rz} L/U$ )
$\tau_{wb}$	delay time of rear road input after front road input (= $l_{wb}/U$ )
$\varphi_{Rf}, \varphi_{Rr}$	phase of measured load in excitation test at front and rear
$\varphi'_{Rf}, \varphi'_{Rr}$	phase of measured load in excitation test at front and rear at 0 m/s
$\varphi_{Af}, \varphi_{Ar}$	phase of aerodynamic force in excitation test at front and rear

Subscripts	in $C_A, c, k, m, f, S, T, \tau$
f	front
r	rear
$m$	inertor
$c$	damping
$k$	spring
$\theta$	pitch motion
$z$	heave motion
-	reversing the sign convention
*	no dimension
ad	air volume added mass
M	scale model
wb	wheel base
Subscripts	in $A, C_L, L, l, R, S$
f	front
r	rear
+	with aerodynamic added mass
M	scale model
'	at 0 m/s
“	reproduced
wb	wheel base
Subscripts	in $z, \theta$
b	body

rd	road
x	difference of body to road
f	front
r	rear
Subscripts	in $G_R, G_A, \varphi_R, \varphi_A$
f	front
r	rear
'	at 0 m/s

# 1. 序論

## 1.1. 研究背景

### 1.1.1. 自動車の空力性能向上における研究課題

自動車の性能に対し、車体回りの流れが及ぼす影響は多岐にわたり (FIG. 1.1), 空気力による燃費・走行安定性への影響, 風切音の発生による静粛性への影響, エンジン・トランスミッション・ブレーキ・エアコンシステム等の冷却性能への影響, 走行風の室内巻き込みやウインドスロップ発生による快適性への影響, 雨流れ・ワイパー浮きによる視界悪化への影響や, 雪やダスト汚れによる被視認性悪化の影響など, 広範囲に渡る (自動車の流れに関わる性能を網羅して示している Hucho, 1998; Schuetz, 2015, および概略を総括している Sumitani, 2007; Maeda, 2011 を参照).

その中でも, 燃費性能に大きく関わる空気抵抗の低減が従来からの大きな課題であり, 注力して開発がなされてきた. その結果, 空気抵抗は大きく改善がなされ, 空気抵抗係数  $C_D$  が 0.24 を下回る車両の実現が可能となってきた (実際の製品の例として, Palin et al, 2012; Kitazawa et al., 2016). その空気抵抗低減とともに, エンジン・ボデー・シャシの性能向上も相まってより高速での走行が可能となってきた. しかしながら, 自動車の車両性能向上の要求は留まることなく, 走行環境が整い高速走行の機会が増加する中で, さらなる燃費性

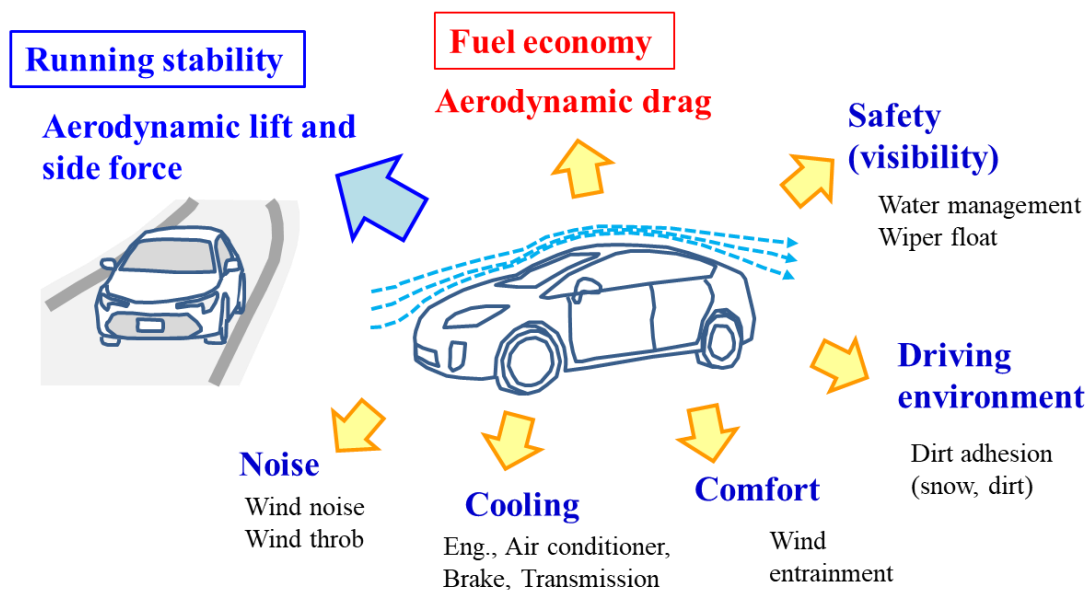


FIG. 1.1 Aerodynamic influences to the vehicle performances due to the flow around the vehicle body (based on Sumitani, 2007 and Maeda, 2011).



能向上と走行安定性向上が今まで以上に求められている。高速走行でのより安全で快適な走行のためには、安定性向上に寄与する空気力からの取り組みも必要であると着眼されており、自動車の空力性能向上における次の重要課題は、空気力による走行安定性の向上となっている。

### 1.1.2. 空気力による走行安定性向上への先行研究

空気力による走行安定性の向上の必要性が高まっていることから、製品化された車両において、空気力を活用した性能向上技術が多数取り入れられている。従来からの性能向上手段として、空気リフト力に着目したスポイラー（フロントバンパ下で流れを剥がすデフレクター形状、リヤトランク上のウイング形状、またはリヤトランク上面のフラット面形状）が主に取り入れられてきた。レース車両ではフロントバンパ下端形状、リヤウイングが、基本デバイスとして必ず取り入れられている（例えば、Nastov et al., 2019）ものであり、一般的な乗用車においても、フロントバンパ下端のスポイラー形状（例えば、Arai et al., 2015）や、リヤトランク後端部形状によるスポイラー効果（例えば、Mayer et al., 2011）が、基本的な走行安定性向上技術として活用されている。

これらの空気リフト力の着目に加え、近年では、流れの乱れや空気力の変動、空気横力にも着目点が広がり、新たな観点による性能向上策が見られるようになってきている。従来のスポイラーとは違う空力デバイスとして、FIG. 1.2 に示すようなアイテムが用いられてきている。縦渦を利用し流れを添わせて変動を抑制するボルテック

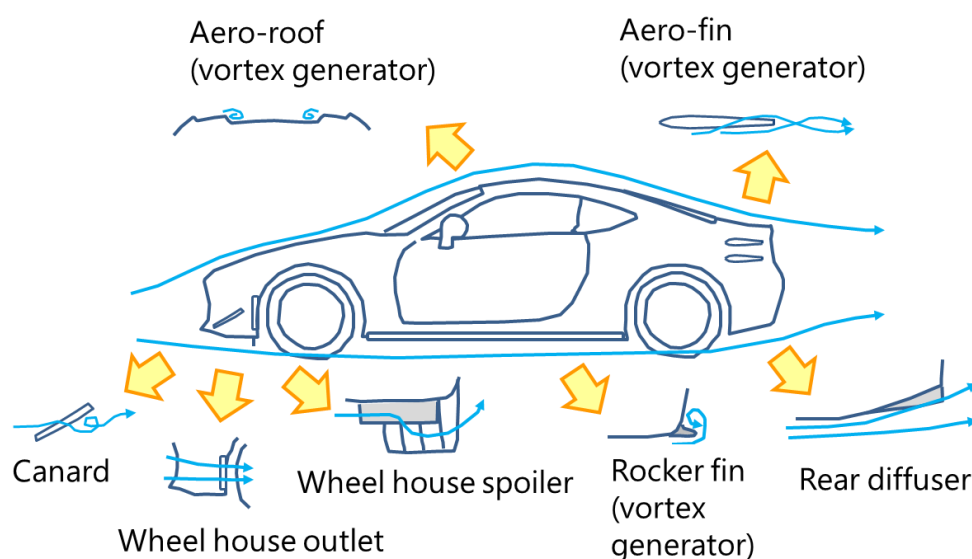


FIG. 1.2 Recently aerodynamic devices for improving the vehicle dynamic stability

スジェネレータ効果を持つ各部形状(フィン形状のボルテックスジェネレータの例として, Saito et al., 2012), ホイルハウス回りの流れを整流し変動を抑えるホイル前カナード形状, ホイルハウススポイラー, ホイルハウスアウトレット構造, および流れをスムーズに後方へ送り流れを安定させる床下リヤディフューザ(製品化事例として, Nishiura et al., 2013; レース車での事例 Nastov et al., 2019; ホイルハウス周り流れの解析検討例 Pinheiro et al., 2020)などが取り入られている. これらの新しい走行安定性向上策は, 定常走行を考えた空気リフト力のみを考えた解析ではその効果を十分に説明できないことが多く, 実際の車両開発の中では走行評価に頼った最適化を行っている. それらの新しい向上策効果を説明するためには, 空気力の時間変化や変動, 入力に対する応答といった, 非定常空気力特性まで着目し解析することが必要と考えられる. 風入力の変化や路面・操舵入力での運動により, 車両各部の流れに加減速や乱れが発生, 流れの剥離・後流変化・床下流量変化等により非定常空気力が発生し, その影響が少なくないと考えられる.

車両の走行性能に影響する空気力の種類を分類すると, TABLE 1.1 のように分けることができる. まず大きく2つに分けられ, 従来から評価されている定常空気力(一定条件下での時間平均で表される空気力の大きさ)と, 近年着目されている時間変化を考えた非定常空気力に分類される. 定常空気力の空気抵抗( $C_D$ )は, 燃費性能に大きく影響を与えることから多くの取り組みがなされており, 前述のように大きく性能向上が図られている. 定常空気リフト力( $C_{Lf}$ ,  $C_{Lr}$ )に対しては, レース車両での性能向上から始まり乗用車にも適用され, タイヤ接地力を変化させることで操舵時のヨー運動の応答性・安定性向上を図っており, その運動との関係解析が継続して

TABLE 1.1 Classification of the aerodynamic forces and effects on the vehicle performances (based on Maeda, 2011).

Type of aerodynamic forces		Primary effects on vehicle performance	
Steady aero-forces	(A) Drag ( $C_D$ )	Fuel consumption and acceleration	
	(B) Lift ( $C_{Lf}$ , $C_{Lr}$ )	Response of steering and stability	
	(C) Side force, Yaw and Roll moment ( $C_S$ , $C_Y$ , $C_R$ )	Stability against side wind	
Unsteady aero-forces	(D) Fluctuating aero-force caused by flow fluctuation	(D1) Natural side wind	Stability against side wind
		(D2) Wake behind vehicle	Stability at straight running
	(E) Dynamic aero-force caused by vehicle motion	(E1) Road input	Stability and comfort
		(E2) Driver steer	Response of steering and stability

行われている(リフト力影響を運動応答特性変化として捉えた Tomiyama et al., 2002, リフト力影響を操舵時の運動シミュレーションで検討した Cai et al., 2017 等). 横方向の定常空気力(空気横力・ヨーモーメント・ロールモーメント: $C_S, C_Y, C_R$ )については, 横風安定性向上への取り組みがされており, 発生する定常空気力の低減検討(例として, Howell, et al., 2016)や, 定常空気力の横風時のヨー・ロール運動への応答特性解析(例として, Maeda, et al., 1995)が行われている. 走行中に働く空気力の影響は大きく, 適切にコントロールすることが重要であり, これまでの定常空気力の観点での解析・検討により, 空気力の走行安定性向上への活用を可能としてきた.

しかしながら, 実際の車両走行において走行条件は一定でなく変化しており, 自然風の乱れた流れや横風突風に遭遇した場合, 他車接近による流れの乱れを受けた場合, さらに路面外乱や操舵による車両運動で姿勢変化を起こした場合などにおいては, 空気力が時間変化・変動を起こし走行安定性に影響を与えている. これらの走行状態では, 車両のわずかな形状差でもドライバーは走行安定性の違いを感じており, 空気力の時間変化・変動を考えた性能向上が必要と考えられ, その最適化が求められている. 空気力による走行安定性のさらなる向上のためには, 定常空気力だけではなく非定常空気力まで観点を広げた解析が必要と考えられる.

### 1.1.3. 非定常空気力の関する先行研究

非定常空気力には, TABLE 1.1 に分類されるように, 入力される流れ変動により発生する空気力と, 車両の運動によって発生する空気力が考えられる. 入力される流れ変動は, 自然風(他車影響も含む)の時間変化によるものと, 自動車自らが起こす乱れによって発生する流れ変動の入力が考えられる.

自然風の時間変化については, 横風突風時に空気力がオーバシュートする非定常な現象の解析(例として, 実車走行・モデル走行実験による検討, Kobayashi et al., 1988 や, 数値計算による検討, Nakashima et al., 2010 など)が多く行われてきた. それに続き, ランダムに変化する自然風に対する非定常空気力応答(応答ゲイン・遅れ)として捉える解析(例として, 実車風洞での風変動スペクトルを再現した検討, Cogotti, 1999, 模型風洞での風変動スペクトルを再現した検討, Schroeck et al., 2011, 実車風洞での自然風時間変化を再現した検討, Yamashita et al., 2017 等)が行われている. また一様の風の中であっても, 自動車形状の特徴である大きな後流

での渦の発生による自ら起こす非定常空気力にも着目され、その解析(例として、実車風洞での自励変動解析, Sterken et al., 2015 や、模型風洞での自励変動解析, Kawakami et al., 2015)も行われている。

これらの入力される流れ変動によって発生する空気力の解析において、自動車に働く空気力の時間変化にも着目すべきであること、周波数応答特性(ゲイン・遅れ変化)を持っていること、それらの走行安定性へ与える影響が小さくないことが確認されており、非定常空気力の考慮は重要であることが示されている。そのことから、流れ変動入力ではない別の要因として、車両運動によって発生する空気力にも着眼が必要と考えられるようになった。

#### 1.1.4. 運動で発生する非定常空気力に関する先行研究

車両が運動することによって相対的に風の入力方向が変化し、車両回りの流れ変化を起こすことになるため、流れ変動風の入力と同様に、非定常な空気力(周波数応答特性を持った空気力)が発生していると考えられる。車両運動によって発生する非定常空気力については、TABLE 1.1 で示すように、直進時の路面入力による縦運動(上下変位・ピッチ角)で発生するものと、ドライバー操舵による横運動(横変位・ヨー角・ロール角)で発生するものが考えられる。

運動による非定常空気力については、Aschwanden らが、レース車両を対象に縦運動(上下変位・ピッチ角)に対しての模型実験を、自動車用模型風洞に加振装置を導入して空気力を計測することから始められた(Aschwanden et al., 2006)。それに追従して乗用車を対象とした検討も始められ、実走行での縦運動の計測(Okada et al., 2009)や、実車風洞で縦運動加振する実験(Takeuchi et al., 2010)が行われ、非定常空気力の考慮の必要性が確認されていった。さらに、運動による非定常空気力の発生を詳しく捉えるため、模型風洞による縦運動加振実験(それぞれの風洞において専用の加振機を導入して実施された、基本模型での加振実験, Kawakami et al., 2010; Kuratani et al., 2018; Maruyama et al., 2019 や、実車を模擬した自動車模型で形状変化を検討した加振実, Yamashita et al., 2011 等)が多数なされるようになってきている。実験の実施に対応し、近年の計算技術の進歩により可能となった数値計算による運動で発生する非定常空気力解析(Sato et al., 2011 等)も行われ、非定常空気力の発生の確認が重要な研究テーマとして取り組みがなされていった。

さらに、横運動(横変位・ヨー角・ロール角)に対しても検討が行われるようになり、模型実験による横運動加振での計測(基本模型でのヨー加振実験, Passmore et al., 2006; 自動車模型での横・ヨー加振実, Pascal et al.,

2011; 自動車模型でのロール加振実験, Nakae et al., 2013 等)により, 非定常空気力の発生の確認がなされてきている. 数値計算においては, 運動で発生する非定常空気力の確認と合わせて, 運動との連成解析も同時に行われ (Tubokura et al., 2012; Ikeda et al., 2016 等), 運動への影響の確認も検討されている. また, 実走行での横運動時の非定常な流れ変化計測 (Okada et al., 2014) も行われ, 実際の走行での非定常な現象の発生とその影響確認を行っている. 以上のように, 運動で発生する非定常空気力の観点での解析が増加しており, 非定常空気力のコントロールは, 走行安定性への重要な制御手段として認識されている.

運動によって発生する非定常空気力についての取り組みは, 自動車での検討例は少なかったが, 船舶においては以前から詳しくなされており, 流体の付加質量・ダンピングを考えた船体運動について整理がなされている (例えば, Koyama et al., 1982). また, 航空機においても同じく以前から進められており, 近年においても操縦性の観点での検討が続けられている. それらの中では, 非定常な流体力を運動に対する応答関数として捉え, 運動と流体力を連成させた定式化を行っており, それにより非定常流体力の影響を運動の変化として定量的に予測可能としている (例えば, 航空機模型での風洞加振実験により空気力係数を求めている検討, Gergmann et al., 2008, 数値計算により空気力応答を求めている検討, Ghoreyshi et al., 2012, 翼形状での運動時の空気力を風洞で計測し定式化する検討, Ertveldt et al., 2016, 航空機形状での空気力応答関数として定式化する検討, Murrhy et al., 2017 等が近年も続けられている). それらの解析方法を自動車へ適用することで, 運動により発生する非定常空気力を応答関数として定式化, 運動との連成を考えた解析を実施し, 運動への影響を定量的に示すことができると考えられる.

現状までの自動車における運動で発生する非定常空気力への取り組みは, その発生を時系列で確認しているもの (ここまでに示した検討例) がほとんどで, 船舶や航空機で行われているような, 応答関数として捉え運動との連成解析を行っている例はわずかにしか見られない. その少ない先行研究としては, Ogawa ら (Ogawa et al., 2012) が, ピッチ運動で発生する空気力を計測し空気ダンピングの発生を確認, 空気ダンピング係数を求めている. その空気ダンピングの作用により路面入力時ピッチ運動が変化することを, 時系列の運動シミュレーションで示している. また, Kawakami ら (Kawakami et al., 2012) は, 縦運動 (上下変位・ピッチ角の2自由度) で発生する非定常空気力を計測し, 空気ばね・空気ダンピング・空気マス (イナータ) までを考えた空気力として捉え, 応答関数化して定式化している. その結果を用い, 路面入力に対する車両運動応答への影響を応答関数の変化として示している. これらの Ogawa らと Kawakami らの検討は, 運動で発生する非定常空気力を応答関数として捉

え、運動への影響も応答関数として定式化することもできている。しかしながら、基本的な形状での検討であり、実際の車両形状、形状違いでの変化、走行条件による違いを考えた検討までは進んでいない。実際の車両開発での性能向上に取り組んでいくためには、実際の車両形状・細部の形状違いを模擬し、実際の走行条件(路面・操舵の入力での運動)を考慮した検討を、さらに進める必要がある。

TABLE 1.1 で分類した空気力の車両運動への作用を、概略図で FIG. 1.3 に示す。ここまでに示してきたように、定常空気力(B:リフト力, C:横力・ヨーモーメント), 流れの変動により発生する非定常空気力(D1:風変動, D2:自励流れ変動)については検討が多くなされているのに対し、前述したように、運動で発生する非定常空気力(E1:縦運動, E2:横運動)についてはまだ取り組みが少ない。実際の車両で取り入れられている新しい走行安定性向上策の効果が十分に説明できていないのは、この運動で発生する非定常空気力の解析が不十分なためと考えられる。路面入力・操舵で車両運動が起こった場面において、空気力の効果は一定走行時よりも大きいと感じられており、この観点での解析を進めることでその説明が可能となり、さらなる性能向上も可能になると考えられる。今後の自動車の空力性能開発の取り組みテーマとして、非常に重要である。

運動で発生する非定常空気力は、直進時の路面入力による縦運動(上下変位・ピッチ角)で発生するもの(E1)と、ドライバー操舵による横運動(横変位・ヨー角・ロール角)で発生するもの(E2)があり、ともに走行安定性

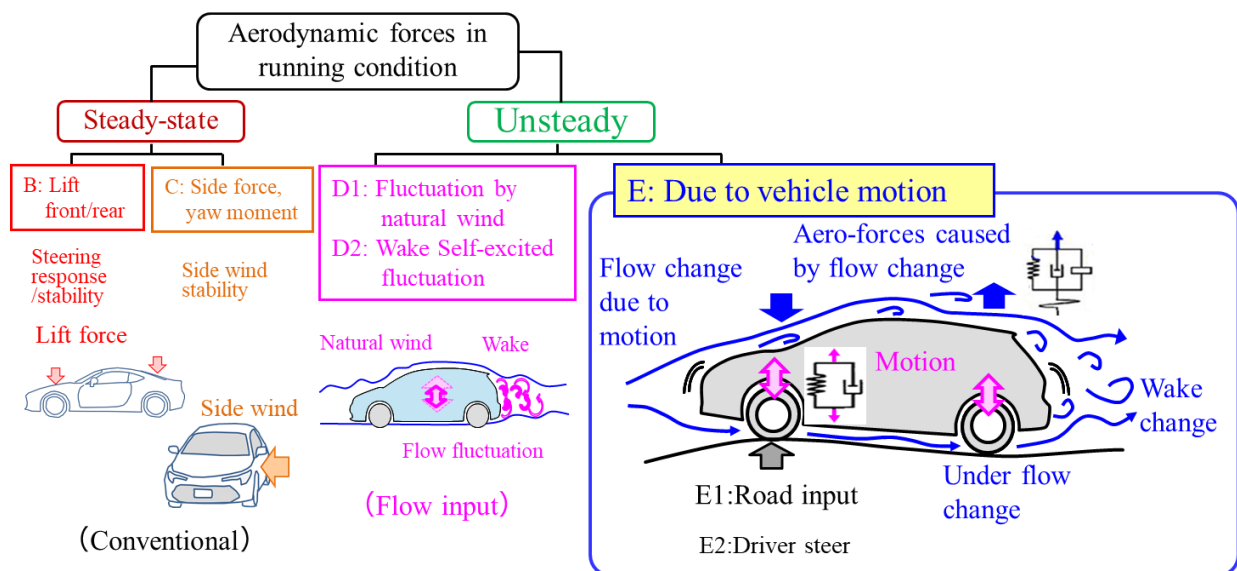


FIG. 1.3 Classification of aerodynamic forces in running condition and focus point of each aerodynamic force to the vehicle dynamic behavior (based on Maeda, 2011).

への影響は大きいですが、縦運動についての解析の方が運動の自由度が少なく、実験・解析がしやすいと考えられる。そのため、まず縦運動についての検討を進め、その結果を基に、横運動の検討も進める手順が良いと考えられる。縦運動での非定常空気力の発生については、FIG. 1.3 E に示すような現象によるメカニズムが考えられる。路面入力により車両のサスペンションが応答し車両ボデーが運動を起こし、そのボデー運動により車両回りの流れが変化を起こす。それにより、車両各部の流れに加減速や乱れ変化が発生し、流れの剥離・後流の変化・床下流量変化などが起こり、それに伴って非定常な空気力が発生する。この時、自動車においては、その形状が流線型ではなく鈍頭物体であり後流領域が大きいこと、地面と車両床面の間隔が狭く流体的な地面効果が発生しやすいことから、非定常空気力の発生が大きくなっていると考えられる。

## 1.2. 本研究の目的, 概要

前節で述べたように、運動による非定常空気力に対する取り組みは近年進められてきているが、時系列での確認までがほとんどであり、非定常空気力を応答関数として定式化を行った検討はまだわずかである。そのため、実際の車両で取り入れられている新しい走行安定性向上策の効果について、ドライバーは感じられるものの、定量的には示すことができていないと考えられる。形状違いによる非定常空気力の変化を応答関数として表すことができれば、運動への影響を定量的に解析し、効果を運動挙動変化で示すことができると考えられる。

そこで本研究では、まず自由度が少なく実験・解析のしやすい車両縦運動(ピッチ・上下運動)を考え、路面入力を想定した運動で発生する非定常空気力を対象とし、それを応答関数として定式化し、運動へ与える影響を定量的に示す解析手法の検討を行った。その手法を用いることで、車両形状の細部変化でドライバーが感じる運動への効果を、発生空気力の違い・運動挙動の違いとして定量的に示すことを目的とした。

それにより、今まで走行試験でのドライバーの感じ方によって行っていた車両開発を、風洞試験結果に基づく解析による定量的な開発に変えることができると考えられる。そして、その新たな性能開発手法が、より運動性能の高い車両の実現につながることを期待できる。さらに、本研究の解析結果を横運動に対しても適用し、研究内容をさらに広げていくことも可能である。

本研究内容は、Kawakamiらの基本的なモデルによる検討(Kawakami et al., 2012)をさらに進めたものであり、路面入力時の車両縦運動(上下・ピッチ)を対象として、風洞実験と運動解析、実走行運動計測、流れ応答計測を、以下の順で行った。

1. 風洞での模型加振実験による, 運動で発生する非定常空気力の計測と応答関数への定式化 (第2章)
2. 非定常空気力を考慮した運動応答関数の算出・時系列シミュレーションによる, 路面入力時の運動に与える影響の定量的解析 (第3章)
3. 実走行運動挙動の計測・ドライバー評価による解析結果の検証と, 非定常空気力の影響割合算出・車両周りの流速応答計測による流れ考察 (第4章)

また, 以下の内容を本研究の新規性として行った.

- A) 実際の車両形状(ホイールやホイールハウスまで再現した模型)で発生する非定常空気力の確認
- B) 細部形状(今回は車両ルーフ上の突起)での非定常空気力変化, および運動への影響確認
- C) 実走行運動計測による解析結果の検証
- D) 非定常空気力の車両特性への影響度解析
- E) 流れ応答の計測と考察



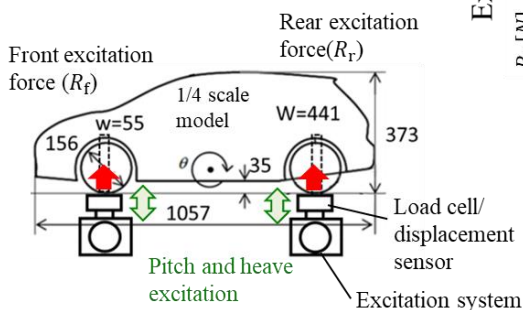
## 2. 運動で発生する非定常空気力の計測と定式化

### 2.1. 実験装置と解析手順

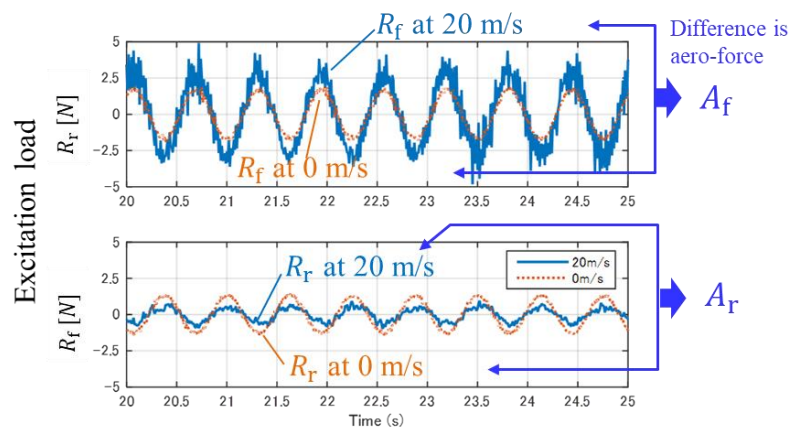
#### 2.1.1. 模型風洞加振試験の概要

車両の運動によって発生する空気力を計測するために、風洞内での変位加振実験を行い、風速有り無しでの加振荷重差から空気力を抽出する方法を用いた。車両模型用の加振装置を開発して風洞内に設置し、内蔵した荷重計によって作用する荷重を計測した。Yamashita らの検討で用いられた同じ設備で行った (FIG. 2.1 (a), Yamashita et al., 2011)。

路面入力により車両ボデー運動が起こり空気力を発生するが、流れの観点からはボデーと路面の距離の変化により空気力が発生すると捉えられる。風洞実験においては、路面は固定した(風洞の地面板は動かない)状態で車両ボデーを加振し、その運動時の流れ変化を再現した。車輪およびホイールハウスまで模擬した実在する車両形状の 1/4 模型を用い、模型の支持・加振のスティングは、流れを乱さないよう車輪を貫通させて設置している。使用した風洞は、車両模型用の小型風洞であり、ゲッチンゲン・オープン型で、吹き出し口 幅 1.4 m×高さ 0.7 m, 測定部長さ 2.0 m, 固定地面板で、モデル前方にて境界層吸い込みを行っている。車両中心部での



(a) Excitation test in wind tunnel



(b) Example for measurement results of front and rear loads in pitch excitation (1.6 Hz, 0 and 20 m/s in wind velocity)

FIG. 2.1 Outline on the measurement of aerodynamic forces caused by pitch and heave motion with the excitation tests in the scale-model wind tunnel.

境界層厚さは、排除厚さで 15 mm, 気流温度は  $20 \pm 0.5$  °Cで行い, 気流速度設定は動圧にて行った. 加振装置により, 車両ボデー変位入力としてフロント/リヤ車軸部に上下変位を与え, 上下加振とピッチ加振を行った (FIG. 2.1 (a)). 内蔵された荷重計にて, フロント/リヤ車軸にかかる荷重( $R_f, R_r$ )をそれぞれ計測し, 風速 0 m/s と風速有りの場合の荷重差をフロント/リヤ空気力( $A_f, A_r$ )として計測する(計測例として, ピッチ加振 1.6 Hz でのフロント/リヤ計測荷重を, 風速 0 m/s と 20m/s の場合の時系列データを重ねて示す, FIG. 2.1 (b)). 計測精度を高めるために, 一定周波数での加振によって空気力を抽出し, その周波数を変化させた結果を合わせ, 周波数応答特性として求める方法を用いた.

## 2.1.2. 実験模型

加振実験に用いた模型は, 実在する小型ハッチバック車の表面の凹凸は無くした1/4車両モデルを用いた (FIG. 2.2). 剛性を確保しつつ軽量化しており, 模型ボデー部の質量は 5.9 kg, 加振装置のロードセルより上の可動部分を足し合わせた質量は 11.9 kg (フロント加振軸分( $m_{Mf}$ ) 6.8 kg, リヤ加振軸分( $m_{Mr}$ ) 5.1 kg), 固有振動数は 20 Hz 以上である. ホイルベース( $l_{Mwb}$ : フロント加振軸とリヤ加振軸の距離)は 0.650 m. タイヤはボ

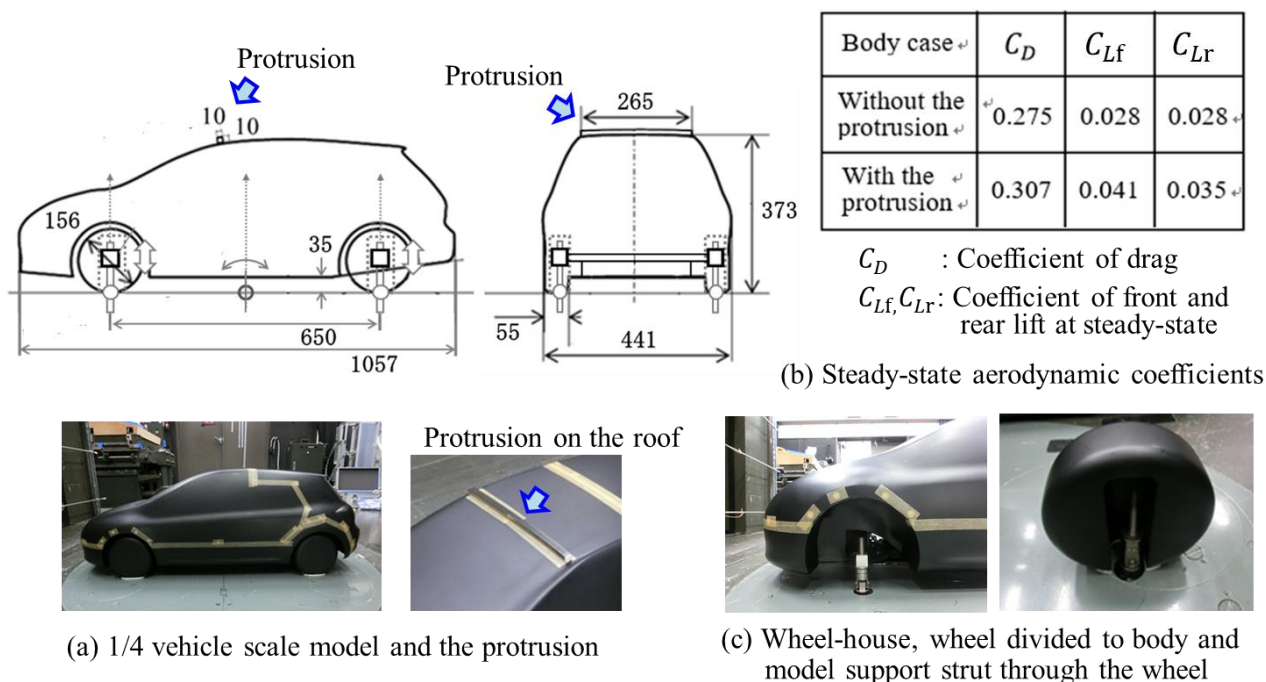


FIG. 2.2 Tested 1/4 scale vehicle model with wheel-houses, the protrusion for comparing case and model support strut. The steady-state aerodynamic coefficients are shown in comparing two cases.

デー部とは別体とし、地面板に固定、ボデーとは干渉しないよう設置している。模型ボデーの支持は、4輪のタイヤの内部を通したストラットで行い、流れを乱さないで支持・加振ができるように設置している。形状変更としては、細部変更でも大きな流れ変化を起し、かつ、乱れの大きさ・境界層厚さの影響も確認できる形状として選び、模型上面のルーフ先端に 10 mm×10 mm の突起を設置した。この形状変更での定常リフト力の差は小さくなく (FIG. 2.2 (b)), 定常空気力の差だけで実際の走行での影響を説明するのは難しいと考えられる。

### 2.1.3. 加振・荷重計測装置

模型用加振装置は、車両模型をホイールハウス内の4か所のロッドで支持し、そのロッドにかかる荷重を計測できる各輪4つのロードセルと、そのロードセルを載せた4つの電動偏心モータで構成されている (FIG. 2.3)。加振モードは、上下・ピッチの複合加振が可能で、4輪それぞれ±20 mm, 0.1~8 Hz までの加振が可能である。荷重の計測は、風洞の主流に対し前後荷重 (空気抵抗), 上下荷重 (リフト力) が4輪ごとに計測可能である。ロッドによる乱れ発生を無くすため、ロッドは地面板に固定されているタイヤ各4輪の内側を貫通させている。ロッドはリンク機構となっており、リンクの可動方向をそれぞれ変えることで、固定と加振の両立を図っている。ピッチ運動で起こるフロントとリヤの車軸間距離の変化は、リヤロッドの傾きで吸収するようにしている。

Hide excitation system and rod under the ground and inside wheels



Flexible rod: consist of fixing and excitation



Motor excitation and load measurement

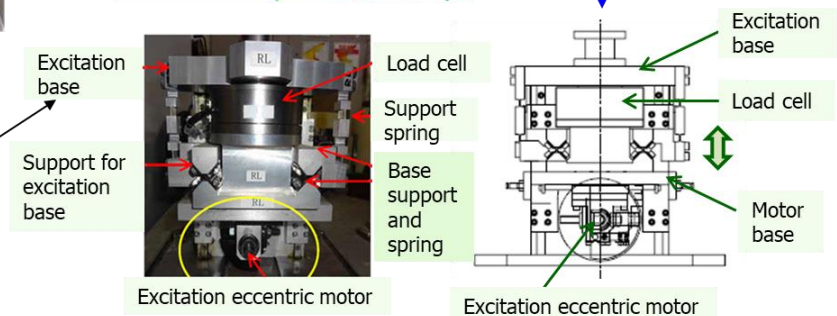
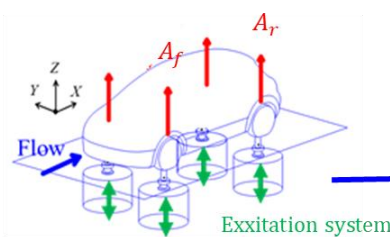


FIG. 2.3 Excitation system including the force measurement system, with eccentric circulate motion motors, load cells, excitation bases, and support springs.

## 2.1.4. 空気力定式化の考慮範囲

解析対象とする非定常空気力について、定式化を考える前提を示しておく。車両ボデー運動によって空気力が発生し、前後車軸に空気上下力 ( $A_f, A_r$ ) として、サスペンションと同様に力が働くと考え (FIG. 2.4)。この空気力は、前後車軸の変位に対して個々に空気力が発生するのではなく、車両全体の車高・姿勢で決まる流れで発生すると考えるのが適切と考え、車両ボデー全体の上下・ピッチ運動に応答して発生すると仮定した。流体的な観点から、車両周り流れは、路面に対する相対的なボデー運動で決まるのが妥当であり、空気力は路面と車両ボデーの相対上下変位 ( $z_x$ )、ピッチ角 ( $\theta_x$ ) で発生するとした。よって、前後車軸にかかる空気力 ( $A_f, A_r$ ) は、上下運動で発生する空気力 ( $A_{fz}, A_{rz}$ ) とピッチ運動で発生する空気力 ( $A_{f\theta}, A_{r\theta}$ ) に分けられ、上下とピッチが合わさった運動でも、その足し合わせで表現できるとして仮定した。また、これらの空気力は、追加されたサスペンションとして捉えることができ、それぞれの運動に対し、空気イナータ、ダンピング、ばね ( $m_{**}, c_{**}, k_{**}$ ) として働くとした。さらに、運動に対しての空気力発生が遅れも考えられるため、必要に応じ一次遅れまで ( $\tau_{**}$ ) を考慮することとした。空気力応答の非線形性については、その定式化が複雑になると考えられることから、まずは線形の

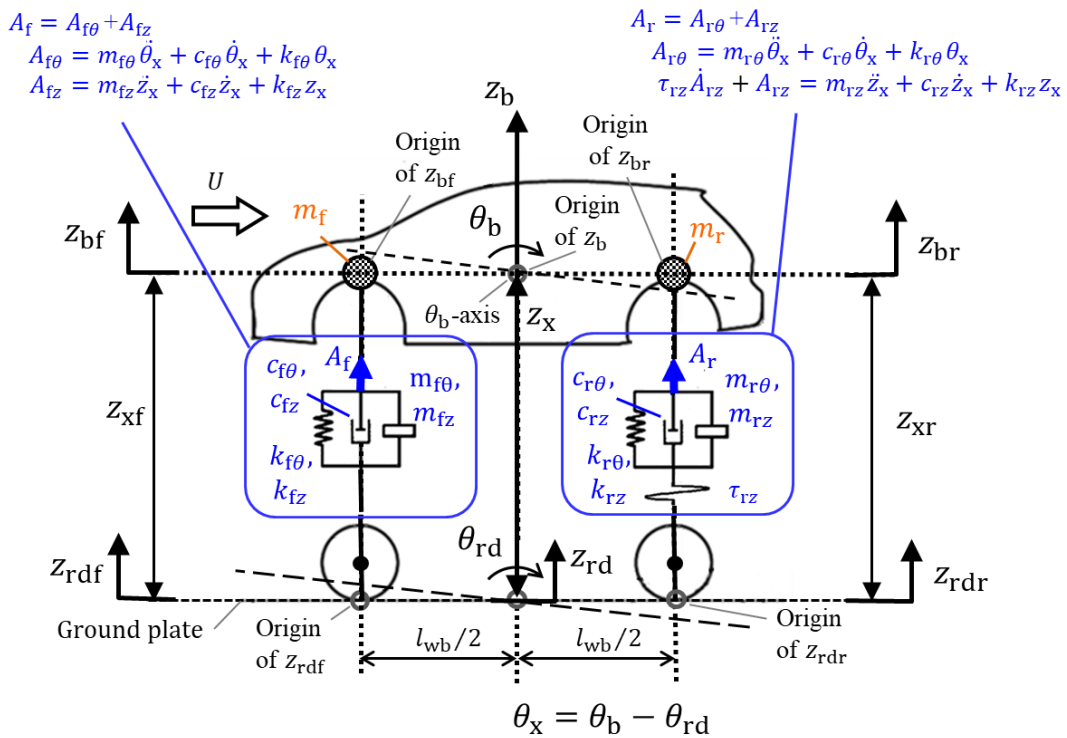


FIG. 2.4 Definition of aerodynamic forces of front and rear caused by pitch and heave motion in this study

範囲でその影響を捉えることとし、本研究では考慮しない。Kawakamiら(Kawakami et al., 2012)の検討にならない空気イナータ、ダンピング、ばねを考え、さらに1次遅れを追加した定式化を行った。

以上のように、本研究では、非定常空気力を線形2次式+1次遅れの範囲での定式化を考え(応答関数として、分子は2次式まで、分母は1次式までを考慮)、解析を行う。解析対象とする周波数領域は、車両運動の共振周波数前後から低周波が重要であることから、実車スケールでの0.2~2.0 Hzをターゲットとして行った。また、本研究の解析においては、一定車速での走行条件を考えていくため、定常空気力(リフト力、空気抵抗)による変化が発生しないことから、解析への考慮は省略した。

## 2.1.5. 空気力モデル定義

前述のように、前後車軸に働く上下空気力( $A_f, A_r$ )を、ピッチ運動( $\theta_x$ )と上下運動( $z_x$ )で発生するそれぞれの空気力の足し算( $A_{f\theta} + A_{fz}, A_{r\theta} + A_{rz}$ )で求められるとし、空気力は、線形2次式(+1次遅れ)で定式化できると考えると、式(1)、(2)で表すことができる。線形2次の空気力係数は、空気イナータ、ダンピング、ばね( $m_{**}, c_{**}, k_{**}$  : 添え字 f, r,  $\theta, z$ )で表され、一次遅れ( $\tau_{rz} = T_{rz} \cdot L/U$ )も考慮される(一次遅れについては、後述の検討で必要となった上下運動でリヤ空気力のみ)。添え字の意味は、f : フロント車軸での、r : リヤ車軸での、 $\theta$  : ピッチ運動で発生する、z : 上下運動で発生する、を表している。

有次元の空気力係数( $m_{**}, c_{**}, k_{**}, \tau_{rz}$ )は、動圧( $1/2 \rho U^2$ )、車両前面投影面積( $S$ )、スケール( $L$ )、車速とスケールの比( $L/U$ )により無次元化でき、無次元空気イナータ、ダンピング、ばね係数( $C_{Am**}, C_{Ac**}, C_{Ak**}$ )、および無次元一次遅れ係数( $T_{rz}$ )変換される。無次元化係数とすることにより、模型実験での結果を実車へ適用することが可能となる。

$$A_f = A_{f\theta} + A_{fz}$$

$$A_{f\theta} = m_{f\theta} \ddot{\theta}_x + c_{f\theta} \dot{\theta}_x + k_{f\theta} \theta_x = \frac{1}{2} \rho U^2 S \left( C_{Amf\theta} \left( \frac{L}{U} \right)^2 \ddot{\theta}_x + C_{Acf\theta} \frac{L}{U} \dot{\theta}_x + C_{Akf\theta} \theta_x \right)$$

$$A_{fz} = m_{fz} \ddot{z}_x + c_{fz} \dot{z}_x + k_{fz} z_x = \frac{1}{2} \rho U^2 S \left( \frac{C_{Amfz}}{L} \left( \frac{L}{U} \right)^2 \ddot{z}_x + \frac{C_{Acfz}}{L} \frac{L}{U} \dot{z}_x + \frac{C_{Akfz}}{L} z_x \right) \quad (1)$$

$$A_r = A_{r\theta} + A_{rz}$$

$$A_{r\theta} = m_{r\theta}\ddot{\theta}_x + c_{r\theta}\dot{\theta}_x + k_{r\theta}\theta_x = \frac{1}{2}\rho U^2 S \left( C_{Amr\theta} \left(\frac{L}{U}\right)^2 \ddot{\theta}_x + C_{Acr\theta} \frac{L}{U} \dot{\theta}_x + C_{Akr\theta} \theta_x \right)$$

$$\tau_{rz}\dot{A}_{rz} + A_{rz} = m_{rz}\ddot{z}_x + c_{rz}\dot{z}_x + k_{rz}z_x = \frac{1}{2}\rho U^2 S \left( \frac{C_{Amrz}}{L} \left(\frac{L}{U}\right)^2 \ddot{z}_x + \frac{C_{Acrz}}{L} \frac{L}{U} \dot{z}_x + \frac{C_{Akrz}}{L} z_x \right)$$

$$\tau_{rz} = T_{rz} \cdot L/U \quad (2)$$

ラプラス変換し、行列で表すと、式(3)のようになる。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{A}_f(s) \\ \hat{A}_r(s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \hat{A}_{f\theta}(s) & \hat{A}_{fz}(s) \\ \hat{A}_{r\theta}(s) & \hat{A}_{rz}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{f\theta}s^2 + c_{f\theta}s + k_{f\theta} & m_{fz}s^2 + c_{fz}s + k_{fz} \\ m_{r\theta}s^2 + c_{r\theta}s + k_{r\theta} & \frac{m_{rz}s^2 + c_{rz}s + k_{rz}}{\tau_{rz}s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2}\rho U^2 S \begin{bmatrix} C_{Amf\theta} \left(\frac{L}{U}\right)^2 s^2 + C_{Acf\theta} \frac{L}{U} s + C_{Akf\theta} & \frac{C_{Amfz}}{L} \left(\frac{L}{U}\right)^2 s^2 + \frac{C_{Acfz}}{L} \frac{L}{U} s + \frac{C_{Akfz}}{L} \\ C_{Amr\theta} \left(\frac{L}{U}\right)^2 s^2 + C_{Acr\theta} \frac{L}{U} s + C_{Akr\theta} & \frac{C_{Amrz}}{L} \left(\frac{L}{U}\right)^2 s^2 + \frac{C_{Acrz}}{L} \frac{L}{U} s + \frac{C_{Akrz}}{L} \\ & \quad \frac{L}{T_{rz}U} s + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} \quad (3) \end{aligned}$$

非定常空気力の定式化は以上のように定義し、非定常空気力係数を模型加振実験により、次項の手順で求めていく。

## 2.1.6. 空気力の定式化手順

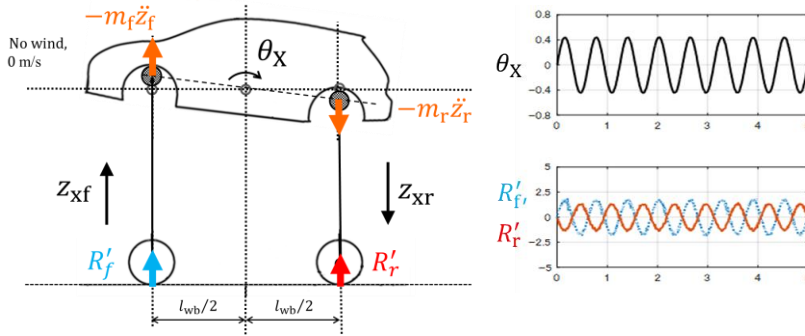
加振試験で得られる計測荷重からの空気力の抽出方法、定式化の手順を以下のように考えた。(FIG. 2.5)

1. 風無し(0 m/s)で、ある一定周波数でのピッチ角( $\theta_x$ )加振、または上下変位( $z_x$ )加振を行い、加振変位とフロント/リヤ荷重( $R'_f, R'_r$ )を同時に時系列で計測.
2. 加振変位に対する荷重応答を単一周波数での応答と捉え、周波数解析により、フロント/リヤ荷重応答のゲインと位相( $G'_{Rf}, G'_{Rr}, \varphi'_{Rf}, \varphi'_{Rr}$ )を求める.
3. 風(定常流)有りで、風無しと同じ一定周波数での変位加振を行い、加振変位とフロント/リヤ荷重( $R_f, R_r$ )を同時に時系列で計測.
4. 風無しと同様に、フロント/リヤ荷重応答のゲインと位相( $G_{Rf}, G_{Rr}, \varphi_{Rf}, \varphi_{Rr}$ )を求める.
5. 風有りの応答から、風無しの応答分を差し引くことで、その周波数でのフロント/リヤ空気力応答のゲインと位相( $G_{Af}, G_{Ar}, \varphi_{Af}, \varphi_{Ar}$ )が求められる.
6. 周波数を変化させ、各周波数での空気力応答(ゲインと位相)を計測し、周波数応答として整理する.
7. 得られた離散的な周波数応答を、最小二乗法により同定し定式化する(本研究では、線形2次式+1次遅れの範囲で行う).

以上の考え方で空気力を抽出し、応答関数として定式化を行っていく。具体的な算出は次節から行っていく。



1. Measurement of excitation loads at a frequency in no-wind (0 m/s)

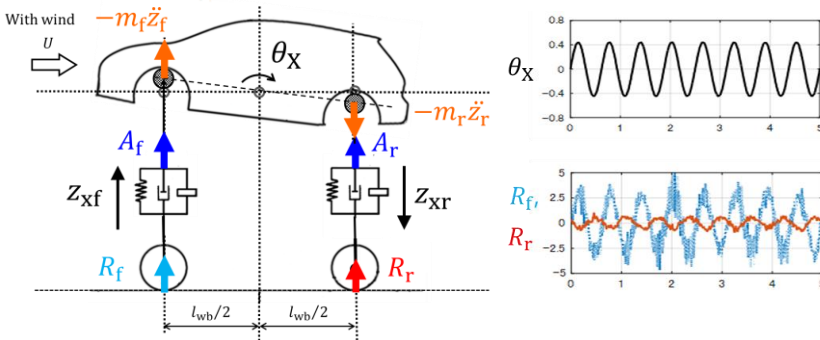


2. Response gain and phase are calculated from time-line data in a single frequency.

$$R'_f = G'_{Rf} \cdot \sin(2\pi f + \varphi'_{Rf})$$

$$R'_r = G'_{Rr} \cdot \sin(2\pi f + \varphi'_{Rr})$$

3. Measurement of excitation loads at a frequency in wind blowing



4. Response gain and phase are calculated in wind blowing.

$$R_f = G_{Rf} \cdot \sin(2\pi f + \varphi_{Rf})$$

$$R_r = G_{Rr} \cdot \sin(2\pi f + \varphi_{Rr})$$

5. Gain and phase of aerodynamic response in a single frequency are obtained by subtracting the response in no-wind from in wind blowing.

$$A_f = R_f - R'_f = G_{Af} \cdot \sin(2\pi f + \varphi_{Af})$$

$$A_r = R_r - R'_r = G_{Ar} \cdot \sin(2\pi f + \varphi_{Ar})$$

7. Formulated aerodynamic response is obtained by identification with least squares method from measured discrete values.

$$\frac{A_{r\theta}(s)}{\theta(s)} = m_{r\theta} s^2 + c_{r\theta} s + k_{r\theta}$$

\*For an example

6. Aerodynamic responses in several frequencies are measured and combined as a frequency response.

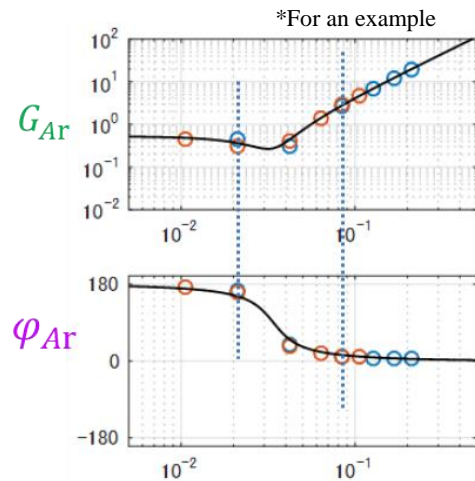


FIG. 2.5 Process of extracting the unsteady aerodynamic forces and formulating to aerodynamic response functions by measured load data in excitation tests.



## 2.2. 計測結果と応答関数算出

### 2.2.1. 模型加振時の流れと荷重応答

運動によって発生する空気力を周波数応答特性として計測するために、車両模型のピッチ・上下加振を行った。前後輪の上下変位  $\pm 2.5$  mm (ピッチ角変化は、 $\pm 0.44^\circ$ )で行い、加振周波数を 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 Hz, 風速を 0, 10, 20 m/s で行った。形状ケースは、前述のルーフ先端突起の有り無しの2ケースを行った。

加振時の流れの様子の一例を、ピッチ 1.6 Hz 加振、風速 20 m/s での突起の有り無しについて、煙線による可視化写真で示す(FIG. 2.6)。突起が無い場合は、ルーフの流れがスムーズで表面の流れが速いのに対し、突起の有る場合は、ルーフの流れが乱れ表面の流れが遅く、その遅い領域が大きいことがわかる。加振運動に合わせて、模型背面へ回り込む流れが見られ後流に渦が発生し、その後放出される現象が見られるが、突起無しの場合は、小さいがはっきりとした渦が確認できる。突起有りの場合は、回り込みが大きい渦としてははっきりとしないことが観察される。この流れ挙動の違いが、非定常空気力の発生の違いを生んでいると考えられる。

加振試験では、各4輪の上下変位と上下荷重を 100 Hz, 100 s で計測し、ピッチ変位( $\theta_x$ )、および上下変位( $z_x$ )に対するフロント荷重( $R_f$ )、リヤ加振荷重( $R_r$ )の応答として整理する。FIG. 2.7 に示すように各変数を定義すると、計測される加振荷重( $R_f, R_r$ )は、式(4),(5),(6)で表すことができる。

$$R_f = -m_f \ddot{z}_f + A_f^+ = -(m_f + m_{fad}) \ddot{z}_f + A_f = -(m_f + m_{fad}) \left( \frac{l_{wb}}{2} \ddot{\theta}_x + \ddot{z}_x \right) + A_f \quad (4)$$

$$R_r = -m_r \ddot{z}_r + A_r^+ = -(m_r + m_{rad}) \ddot{z}_r + A_r = -(m_r + m_{rad}) \left( -\frac{l_{wb}}{2} \ddot{\theta}_x + \ddot{z}_x \right) + A_r \quad (5)$$

$$\theta_x = (z_{xf} - z_{xr}) / l_{wb}, \quad z_x = 1/2(z_{xf} + z_{xr}) \quad (6)$$

加振荷重( $R_f, R_r$ )は、模型慣性力( $-m_f \ddot{z}_f, -m_r \ddot{z}_r$ )と空気力( $A_f^+, A_r^+$ )を足し合わせたものになる。空気力( $A_f^+, A_r^+$ )は、風速が無い場合でも加振によって動かされる空気付加質量による力( $-m_{fad} \ddot{z}_f, -m_{rad} \ddot{z}_r$ )と、運動で発生する空気力( $A_f, A_r$ )の両方を含んでいると考えられる。しかしながら、本研究で抽出する空気力は、風速の有り無しの差から求めるため、この空気付加質量による空気力は考慮されない。その影響の有無を確認するため、計算上の模型質量による慣性力( $-m_f \ddot{z}_f, -m_r \ddot{z}_r$ )と、風速が無い場合(0 m/s)の計測荷重( $R_f', R_r'$ )を比較し、FIG. 2.8 に示した。風無し・ピッチ 1.6 Hz 加振の場合について、計算値( FIG. 2.8 (b) )と実験による計測値

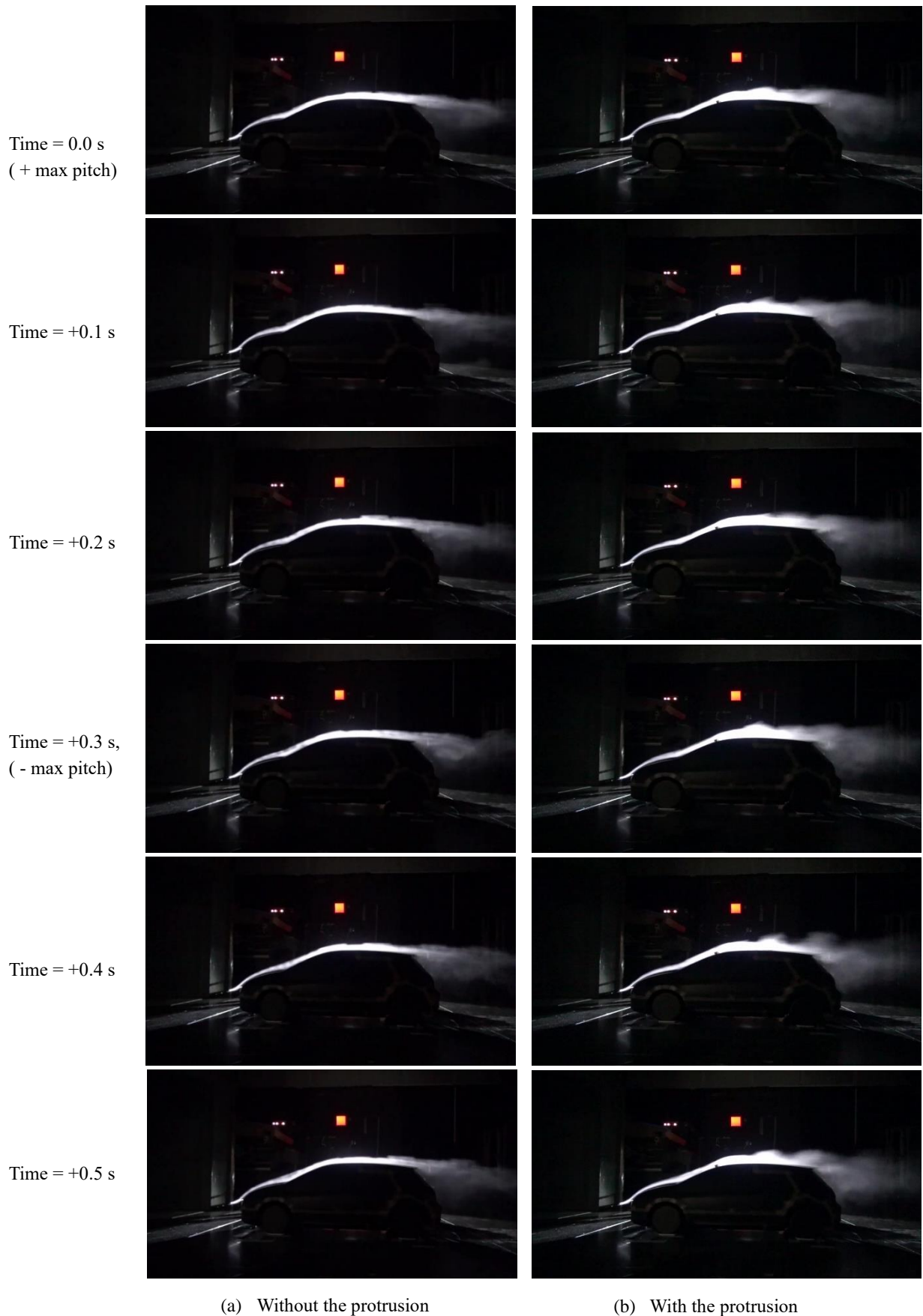


FIG. 2.6 Flow visualizations of smoke with pitch excitation of 1.6 Hz at 20 m/s, without and with the roof protrusion

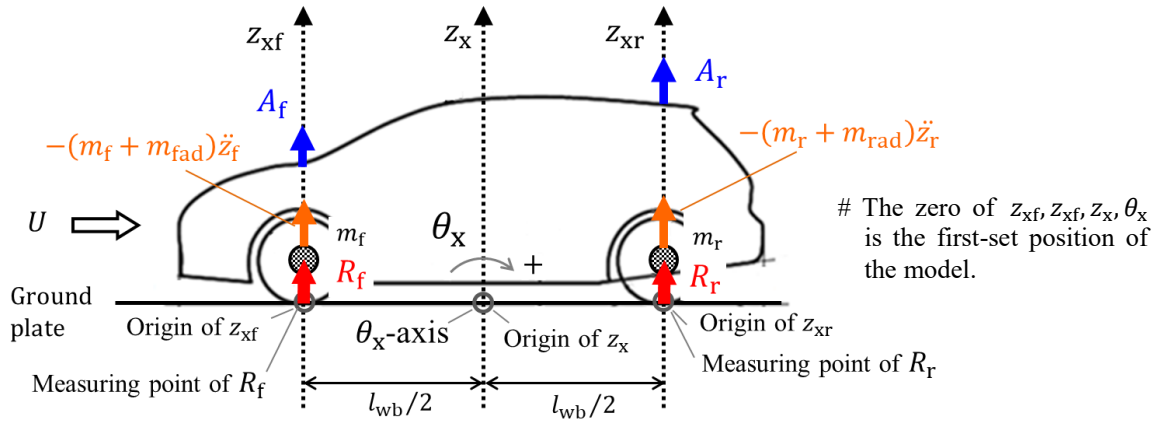


FIG. 2.7 Definition of the variables at 1/4model excitation in wind tunnel.

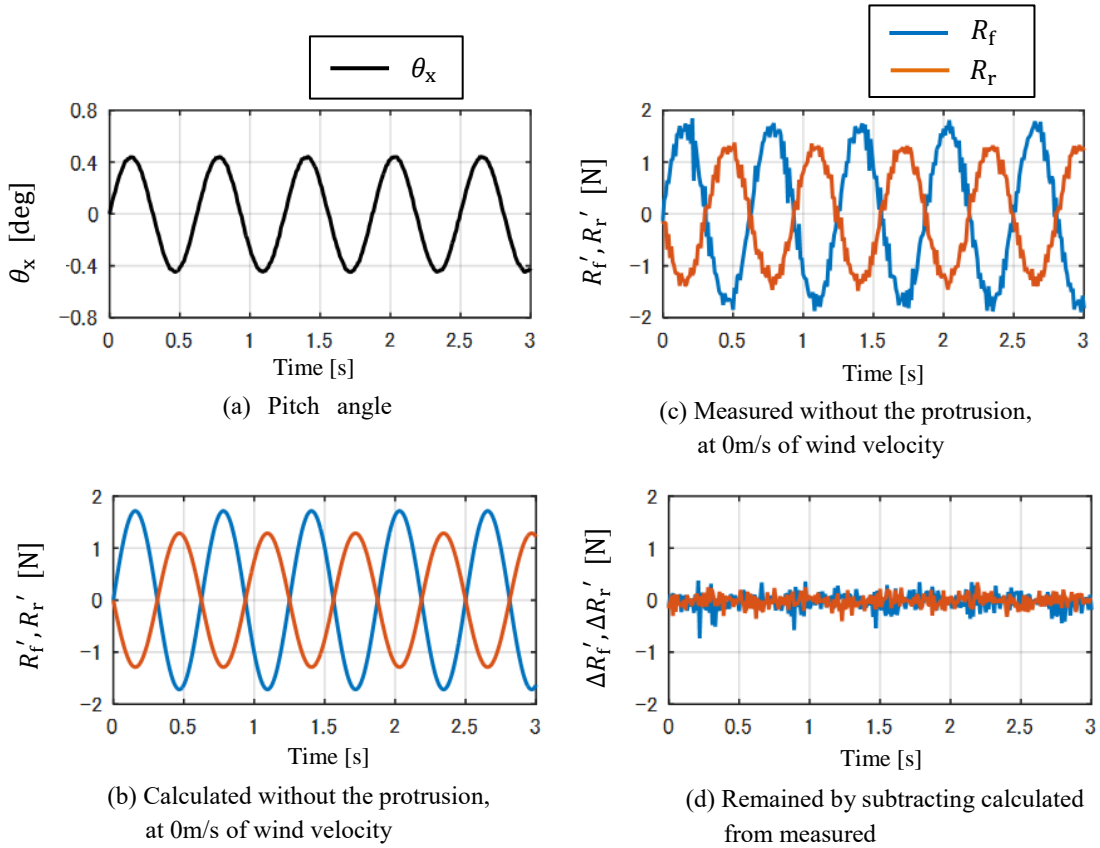


FIG. 2.8 Confirming no-effect of aerodynamic added mass by comparing calculated value to measured load value in pitch excitation test in 1.6 Hz at 0 m/s.

( FIG. 2.8 (c) )を比較し、計測値から計算値を引いた差を FIG. 2.8 (d)に示している。その差はほぼ無く、本研究の中では、空気付加質量の影響は考慮から外しても問題ないことを確認できる。また、加振試験での基準入力となるピッチ変位( $\theta_x$ )、またはホイールベース中心の上下変位( $z_x$ )については、計測したフロント変位( $z_{xf}$ )、リヤ変位( $z_{xr}$ )から式(6)を用いて換算して求めている。

加振実験により得られた計測結果の一例として、突起有り無しの形状差による荷重変化が大きく表れている、ピッチ 1.6 Hz 加振、風速 0 m/s, 20 m/s の突起有り無しのケースを FIG. 2.9 に示す。突起無し形状の風速 0m/s においては、模型慣性力のみが働きピッチ変位に合わせて慣性力に応じた荷重が、フロント/リヤに発生している (FIG. 2.9(b))。それに対し、突起無し形状の風速 20 m/s では、フロント荷重が増加しリヤは減少している (FIG. 2.9(c))。ピッチ運動に対し、フロントは上下変位をさらに促進する空気力が発生し荷重が増加、リヤは上下変位を戻す方向の空気力が働き荷重が減少していることになる。一方、突起有り形状の風速 20 m/s では、フロント荷重は突起無しと同様に増加しているが、リヤ荷重は突起無しとは大きく違い、逆に増加している (FIG. 2.9(e))。フロントとリヤともに荷重が増加しており、ピッチ運動を促進する空気力が発生していることになる。

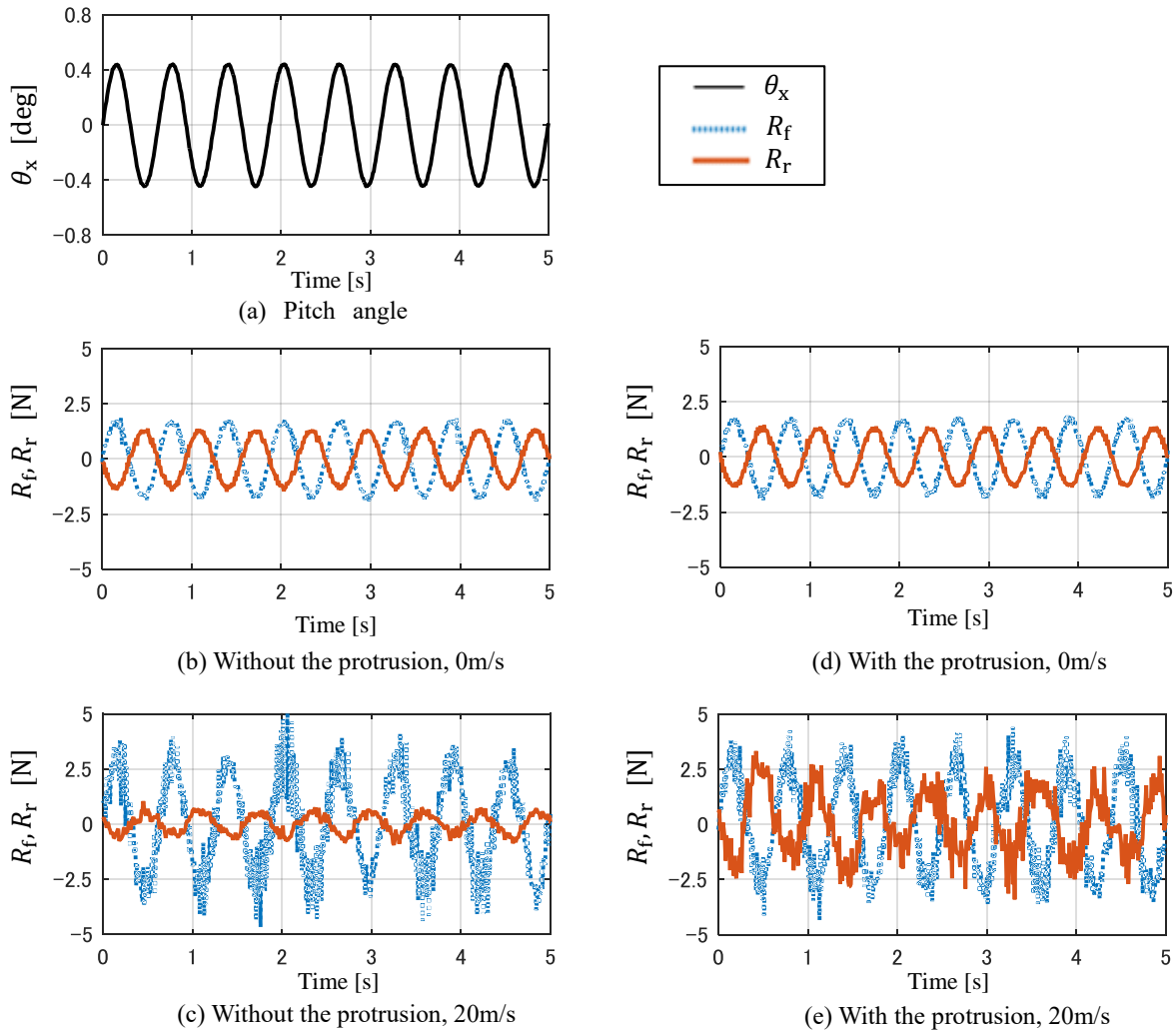


FIG. 2.9 Experimental results of the front and rear measured forces ( $R_f, R_r$ ) with pitch excitation ( $\theta_x$ ) of 1.6 Hz, at 0 and 20 m/s, in comparing models without and with the protrusion.

以上のように、運動によって空気力が発生していること、形状違いによってそれが変化することが確認された。その違いは、今回着目している非定常空気力の影響を示したものであり、これらの加振時荷重の計測結果から空気力を抽出し、形状による発生空気力の違いを定式化によって定量的に示していく。この節では、まず突起無し形状でのピッチ加振について非定常空気力の抽出方法の検討を行い、次節にて、その手法を用いてピッチ加振での突起有り無しの差、上下加振での突起有り無しの差を比較していく。

## 2.2.2. 加振時荷重の周波数応答

風洞での模型加振試験により、運動による空気力の発生と形状違いによる影響が荷重変化として確認できたので、その結果を応答荷重の周波数応答として整理する。各周波数の加振試験ごとに、時系列計測されたの加振変位を入力、荷重応答を出力として、周波数解析によりゲインと位相差を求め、周波数軸に整理した。突起無し、ピッチング加振、0, 10, 20 m/s のケースにおいて、ピッチ変位 ( $\theta_x$ ) に対するフロント/リア荷重 ( $R_f, R_r$ ) の応答を、周波数に対するゲインと位相で示した (FIG. 2.10)。ただし、風速 0 m/s, 0.2 Hz に関しては、外挿による修正を行っている (空気力分の荷重増加は動圧比例することを前提とし、風速 10, 20 m/s, 0.2 Hz の値から求めた)。

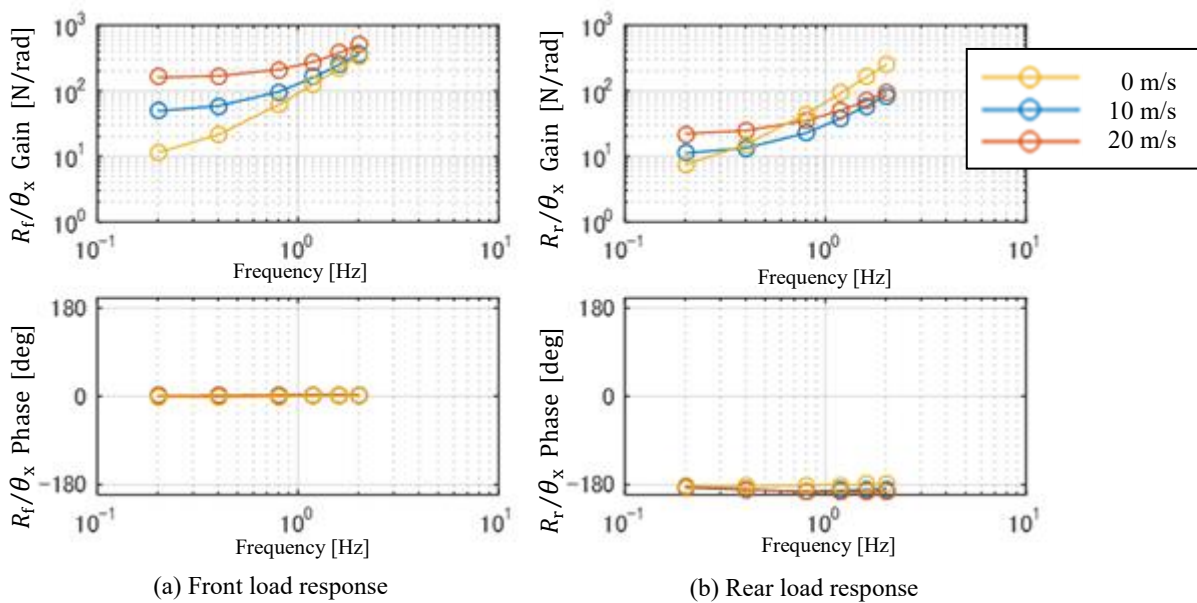


FIG. 2.10 Frequency responses of measured forces ( $R_f, R_r$ ) by pitch angle ( $\theta_x$ ) in pitch excitation of 0.2–2.0 Hz at 0, 10, 20 m/s, on the model without the protrusion.

この風無しの低周波加振の条件では、慣性力が小さいため、機械的な隙が詰まる際に発生する周期的な瞬間荷重が相対的に大きく、その影響を排除するために行った。それ以外の条件では、慣性力、または空気力が大きく働いてくるため、その考慮の必要はなかった。

FIG. 2.10 に示す計測結果から、いずれの条件でも、模型慣性力の効果により、加振周波数が高いほど応答荷重ゲインが大きくなっていることが確認できる。位相に関しては、ピッチ加振であるためフロントはほぼ同相(位相角  $0^\circ$ 、前上がりピッチ変位で上向きの荷重)、リヤはほぼ逆相(位相角  $-180^\circ$ 、前上がりピッチ変位で下向きの荷重)となっている。風速変化により応答荷重が変化し、フロントでは、風速が高いほど低周波応答ゲインが大きくなっている。一方、リヤでは、風速変化により低周波では応答ゲインが大きくなるが、高周波では小さくなっており、周波数による逆転が起こっている。フロントではピッチ運動を促進する空気力が働き、リヤは低周波では促進、高周波では戻す空気力が働き、周波数により影響が変化していることが推測される。

### 2.2.3. 空気力の周波数応答

空気力を抽出するため、FIG. 2.10 で得られた風速がある場合の応答荷重( $R_f, R_r$ )から、風速 0 m/s の場合の応答荷重( $R'_f, R'_r$ )を差し引き、フロント/リア空気力( $A_f, A_r$ )を算出した。上向き空気力を正と定義すると、式(7),(8)の関係から空気力を抽出できる。前述のように、空気付加質量分( $m_{fad}, m_{rad}$ )の空気力は除かれる。

$$A_f = R_f - R'_f, \quad R_f = -(m_f + m_{fad})\ddot{z}_{xf} + A_f, \quad R'_f = -(m_f + m_{fad})\ddot{z}_{xf} \quad (7)$$

$$A_r = R_r - R'_r, \quad R_r = -(m_r + m_{rad})\ddot{z}_{xr} + A_r, \quad R'_r = -(m_r + m_{rad})\ddot{z}_{xr} \quad (8)$$

$R'_f, R'_r$ : The front and rear measured forces in excitation at wind velocity of 0 m/s

その空気力を抽出した結果が FIG. 2.11 となり、フロント空気力応答は周波数によらずほぼ一定、位相はほぼ  $0^\circ$  であり、変位で発生する空気力(空気ばね)が主で、ピッチ加振に対して運動を促進する方向に空気力が働くことがわかる。リア空気力は周波数が高いほど応答ゲインが増加しており、加振速度、加速度に比例した空気力(空気ダンピング、空気イナータ)が作用していると考えられる。その作用が大きい高周波では位相はほぼ  $0^\circ$  で、ピッチ運動を戻す力となっており、一方低周波の加振速度・加速度が小さい範囲では、位相が  $180^\circ$  に近くなっており、変位に比例した空気力(空気ばね)により、ピッチを促進する空気力が働いていると考えられる。

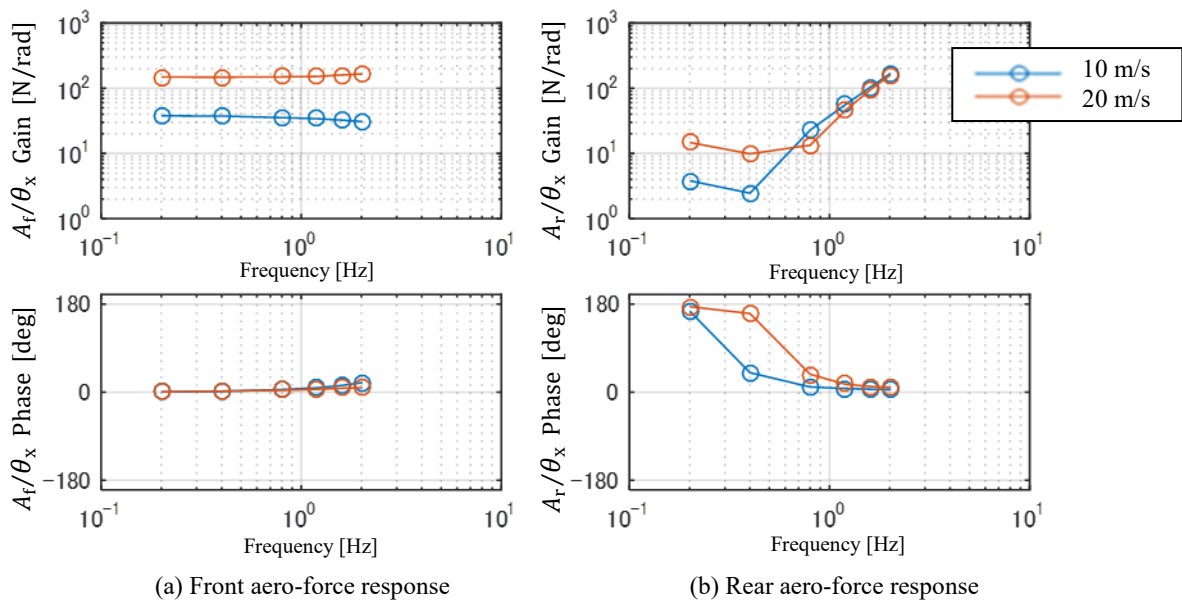


FIG. 2.11 Frequency responses of aero-forces ( $A_f, A_r$ ) by pitch angle ( $\theta_x$ ) in pitch excitation of 0.2–2.0 Hz at 10 and 20 m/s, on the model without the protrusion..



## 2.2.4. 空気力応答の無次元化

FIG. 2.11 で得られた空気力応答の結果を、風速およびスケール違いによっても一般化できるようにと考え、無次元化を行った。式(9)に示すように、無次元周波数( $f^*$ )は風速に対する模型長さの比( $L_M/U$ )で、空気力係数( $C_{Af}, C_{Ar}$ )は動圧( $D$ )と模型前面投影面積( $S_M$ )により、加振変位( $z_x^*$ )は模型長さ( $L_M$ )により、無次元化される。角度( $\theta_x$ )は既に無次元数である。無次元化された結果を FIG. 2.12 に示した。

$$f^* = f \frac{L_M}{U}, \quad C_{Af} = \frac{A_f}{D \cdot S_M}, \quad C_{Ar} = \frac{A_r}{D \cdot S_M}, \quad D = \frac{1}{2} \rho U^2,$$

$$z_x^* = \frac{z_x}{L_M}, \quad \theta_x = \frac{z_{xf}^* - z_{xr}^*}{l_{Mwb}^*} = \frac{z_{xf} - z_{xr}}{l_{Mwb}} \frac{L_M}{L_M} \quad (9)$$

無次元化の結果、風速違いの 10, 20 m/s の変化が重なり、無次元化による整理が有効であることがわかる。この無次元化された空気力応答を定式化することで、風速・スケールの違う条件に対しても適用ができる空気力応答関数を求めることができる。

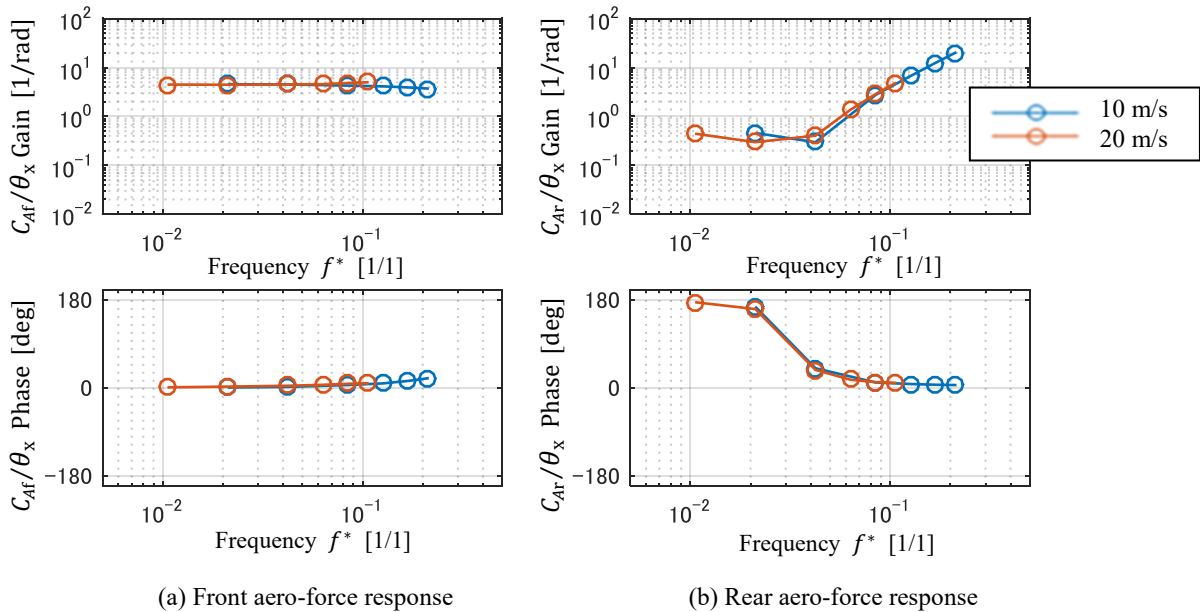


FIG. 2.12 Normalized frequency responses of aero-forces ( $A_f, A_r$ ) by pitch angle ( $\theta_x$ ) in pitch excitation of 0.2–2.0 Hz at 10 and 20 m/s, on the model without the protrusion.



## 2.2.5. 空気力の応答関数化

FIG. 2.12 で無次元化して整理した結果の定式化を行う。ピッチ運動に対するフロント/リアの空気力応答関数として表現するため、空気力を加振加速度・速度・変位に比例する力として捉え、式(10)のように空力係数を、フロントの空気イナータ・ダンピング・ばね係数( $C_{Amf\theta}, C_{Acr\theta}, C_{Akf\theta}$ ), リアの空気イナータ・ダンピング・ばね係数( $C_{Amr\theta}, C_{Acf\theta}, C_{Akr\theta}$ )として定義した。(一次遅れも考慮したが、ピッチに対する応答では必要がなかったため、ここでは省略している。)

$$\frac{C_{Af\theta}(s)}{\theta_x(s)} = C_{Amf\theta}s^2 + C_{Acf\theta}s + C_{Akf\theta}, \quad \frac{C_{Ar\theta}(s)}{\theta_x(s)} = C_{Amr\theta}s^2 + C_{Acr\theta}s + C_{Akr\theta} \quad (10)$$

$\frac{C_{Af\theta}(s)}{\theta_x(s)}, \frac{C_{Ar\theta}(s)}{\theta_x(s)}$  : ピッチに対する空気力の応答関数(フロント, リア)

$C_{Amf\theta}, C_{Amr\theta}, C_{Acf\theta}, C_{Acr\theta}, C_{Akf\theta}, C_{Akr\theta}$ :

ピッチに対する空気イナータ, ダンピング, ばね係数(フロント, リア)

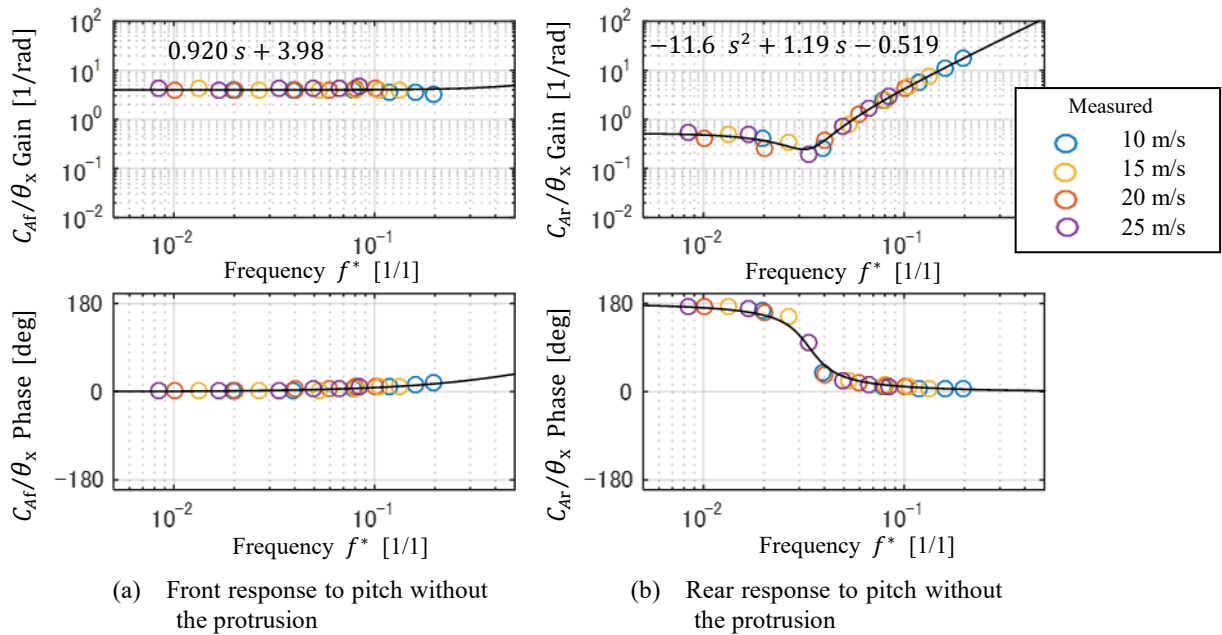


FIG. 2.13 Normalized frequency response functions of aero-forces ( $A_f, A_r$ ) by pitch angle ( $\theta_x$ ) in pitch excitation of 0.2–2.0 Hz at 10, 15, 20 and 25 m/s, on the model without the protrusion.

応答関数への定式化(同定)は、周波数領域で(微分式をラプラス変換で表して)行い、最小二乗法を用いて行った。定式化する次数としては、線形2次式と1次遅れ(分子2次式・分母 1 次式)までの範囲で行い、その中で最適なものを選択し係数を求めた。ここでは、風速 10, 20 m/s のデータに 15, 25 m/s のデータも追加し、全データを合わせて同定を行った(FIG. 2.13)。同定を行った結果の応答関数は式(11)の係数となり、FIG. 2.13 中にその同定された関数を実線で示す。

$$\frac{C_{Af\theta}(s)}{\theta_x(s)} = 0.920s + 3.98, \quad \frac{C_{Ar\theta}(s)}{\theta_x(s)} = -11.6 s^2 + 1.19 s - 0.519 \quad (11)$$

フロントは、空気ダンピング・ばねまでの係数で、伝達応答関数として同定ができた。リヤについては、ダンピング・ばねに加え、空気イナータ係数までを考えることで、満足できる同定をすることができた。

以上により、各周波数で得た空気力応答のゲイン・位相を、風速・スケールでの無次元化を行うことで、1つの応答関数として定式化が可能であることが確認できた。また、運動で発生する非定常空気力の定式化には、運動の加速度・速度・変位によって起こる空気力(空気ばね・ダンピング・イナータ)まで考慮する必要があることが確認できた(ピッチ運動の場合では)。

## 2.3. 形状・運動方向による非定常空気力の変化

ここまで述べた方法により、運動によって発生する非定常空気力を応答関数として表すことが可能であることが確認できた。その方法を用いて、形状違い(突起有り無し)、加振運動の違い(ピッチ角と上下変位)による非定常空気力の違いを明らかにする。形状ケースは、ルーフ先端突起有り無しの2ケースについて、空気力応答関数の比較を行う。運動方向の違いは、ピッチ加振と上下加振について、各輪の上下変位  $\pm 2.5$  mm, 加振周波数 0, 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 Hz, 風速 0, 10, 20 m/s の条件で行う。

### 2.3.1. ピッチ運動時空気力応答の形状比較

ピッチ加振において、突起有り無しの空気力応答関数の比較を行った。突起無しは、FIG. 2.13 に既に応答関数として示しているため、突起有りについても、同様に加振試験を実施して空気力応答関数を算出し、その結果を FIG. 2.14 に示す。フロントは、ほぼ突起無しと同様であるが、リアは突起無しのように大きな周波数変化は見られず違いが認められる。応答関数の算出は、突起無しと同様に、フロントは空気ダンピング・ばねまで、リアは空気イナータまでの考慮により定式化ができています。

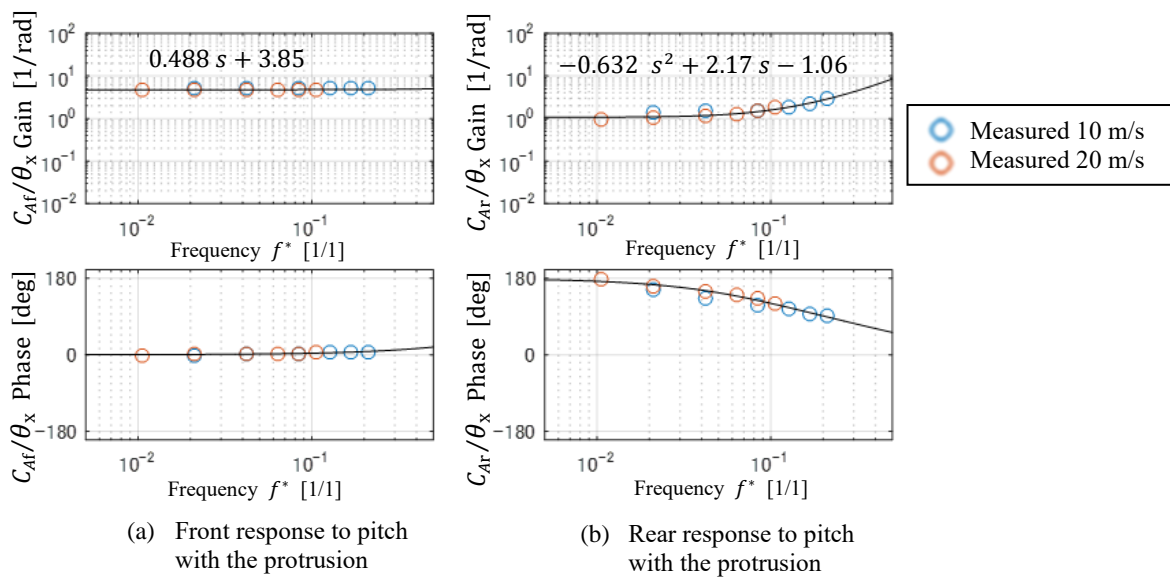


FIG. 2.14 Normalized response functions of aero forces ( $A_f$ ,  $A_r$ ) by pitch angle ( $\theta_x$ ) in pitch excitation of 0.2–2.0 Hz, at 10 and 20 m/s, on the model with the protrusion.

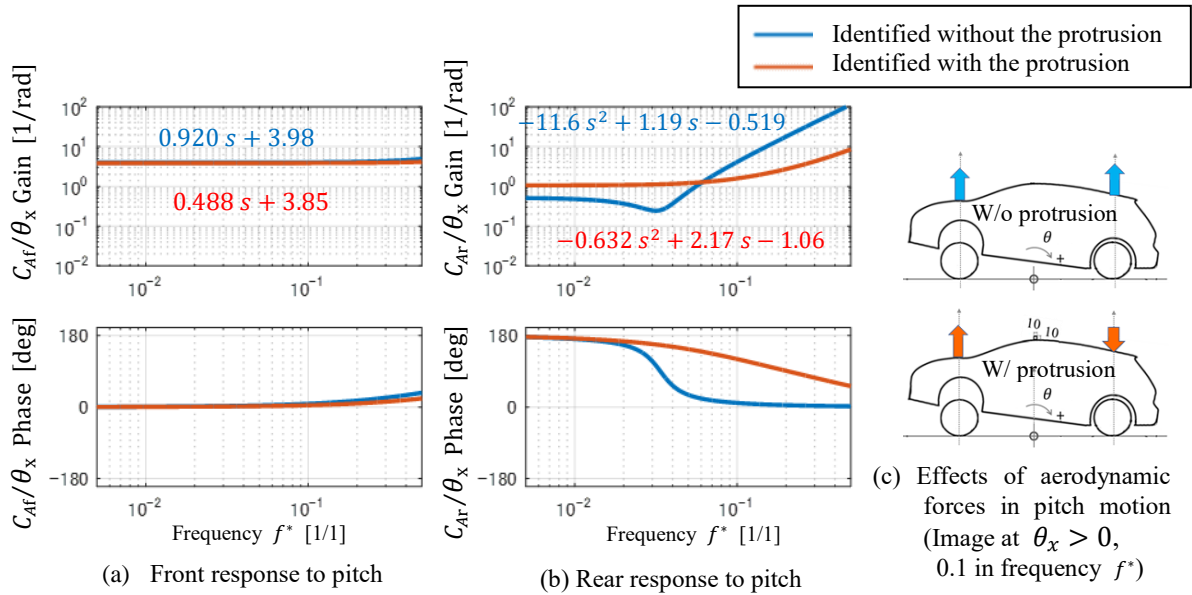


FIG. 2.15 Normalized identified response functions of aero forces by pitch and heave motion, in comparing models without and with the protrusion.

突起有り無しと比較のため、応答関数を同じ図上に合わせて示す(FIG. 2.15). フロント応答には突起無しと有りの差はほぼなく、ともに運動を促進する空気ばねの力が主に働いている(ゲインが一定で、位相がほぼ  $0^\circ$  で一定). 一方、リア応答には大きな差が見られる. 突起無しでは、低周波では運動に対しピッチを促進する空気力が発生しているが(位相が  $180^\circ$ ), 高周波になると逆にピッチを戻す力が大きく働いている(位相が  $180^\circ$  から  $0^\circ$  へ反転, ゲインが高周波で大きくなる). リア応答の突起有りは、周波数による変化はあるものの、低周波から高周波までおおむねピッチングを促進する力が働いている(位相  $180^\circ \sim 90^\circ$ ). 応答関数の係数との対応を見ると、突起無しは空気イナータ係数が大きく、高周波でピッチを戻す力が大きく発生する. 突起有りでは、空気イナータ係数が小さくその効果が無くなり、空気ダンピング係数が優位となり、ピッチを促進する力となっている.

FIG. 2.15(c)に、空気力の発生の概略図を示す. 無次元周波数が 0.1 の(実車 60 km/h 走行で約 0.4 Hz 相当)で、ピッチ運動で前上がりになった状態で、突起無しでは、フロント/リアともに上向きの空気力が発生しているが、突起有りでは、フロントが上向き、リアは下向きの空気力が発生することになる..

### 2.3.2. 上下運動時空気力応答の形状比較

上下加振の場合についても、突起有り無しでの空気力応答を求め、運動方向による違いを確認した。FIG. 2.16 に突起無しの前部、リア((a), (b))と、突起有りの前部、リア((c), (d))の空気力応答を示す。前部の空気力応答では、突起有り無しともに周波数による変化が見られ、高周波になるほど上下運動速度に対し戻す方向の空気力が大きくなっている(ゲインが高周波で大きく、位相が  $-90^\circ$  に近くなる)。リアの応答は、フロントとは逆に、上下運動変位・速度に対し促進する空気力が発生している(ゲイン変化は小さく、位相が  $180^\circ \sim 90^\circ$  となっている)。応答関数への同定では、フロントは空気ダンピングとばねで十分であったが、リアに関しては、空

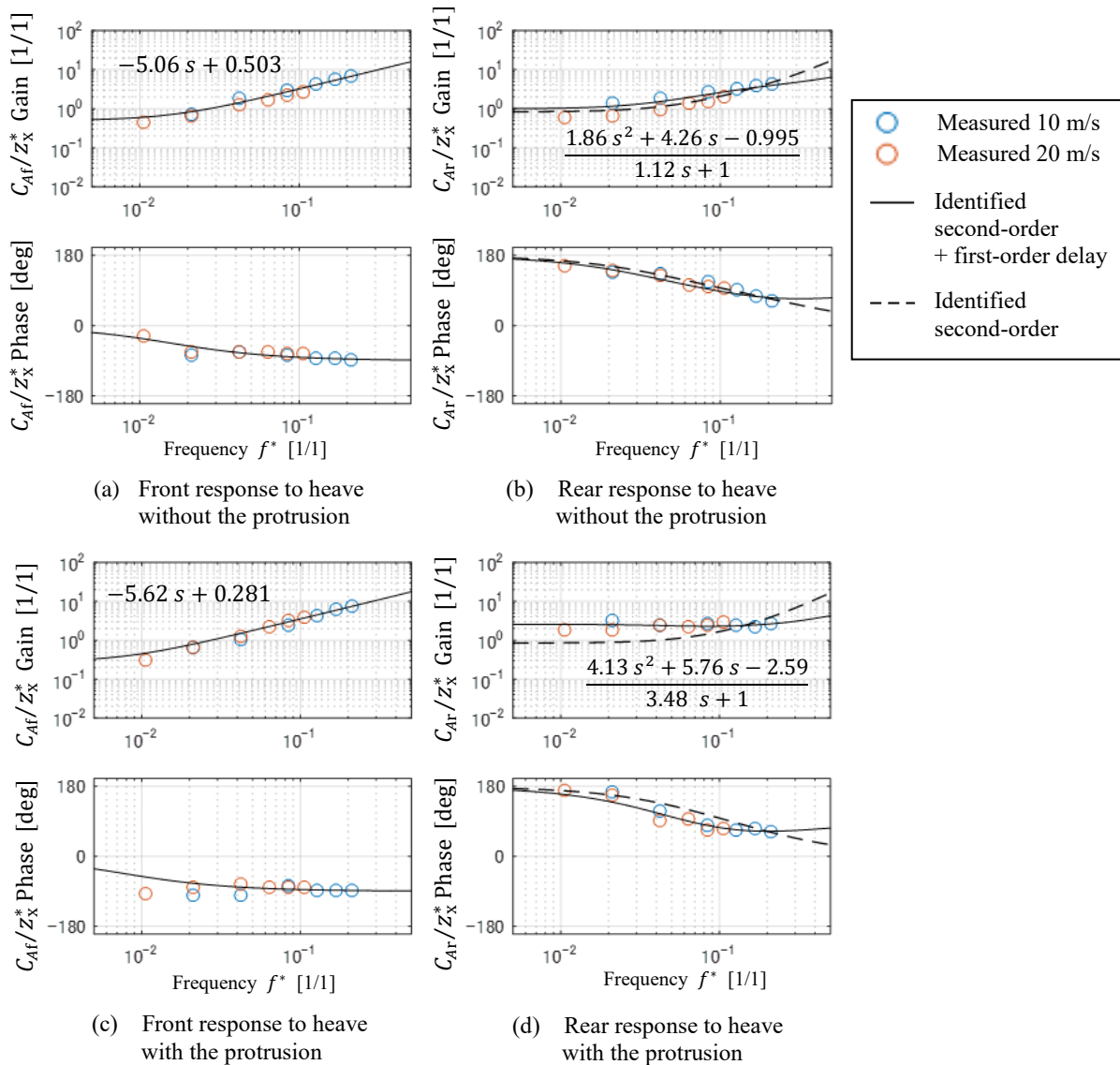


FIG. 2.16 Normalized response functions of aero forces ( $A_f, A_r$ ) by heave displacement at wheelbase center ( $z_x^*$ ) in heave excitation of 0.2–2.0 Hz, at 10 and 20 m/s, in comparing models without and with the protrusion.

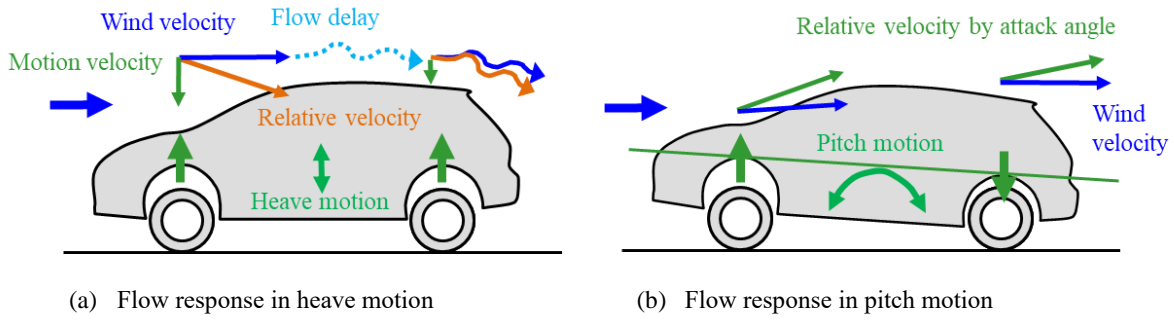


FIG. 2.17 Consideration about the flow response around the vehicle in excitation of heave and pitch

気イナータも必要なのに加え、一次遅れも考慮する必要があった。FIG. 2.16 (b), (d) に線形2次+1次遅れで同定した応答関数を実線で示し、1次遅れのない線形2次のみで同定した応答関数を破線で示したが、特に突起有りの場合において、一次遅れを考慮する必要性が確認できる。ピッチ運動では姿勢が変化するため、車両に対する流れ角度変化がフロント/リヤ部ともに同時に起こり、流れ変化も同時に発生する。それに対し上下運動では主流に対する姿勢変化はなく、フロント部では上下速度による相対速度変化からの流れ変化を起こすが、リヤ部では上下運動による流れ変化が直接起きず、フロント部の流れ変化の結果を受けて流れ変化を起こすことになる。そのため、フロント部に対し時間的に空気力応答の遅れが発生すると考えられる (FIG. 2.17)。

上下運動に対する定式化は、空気イナータ、ダンピング、ばね係数 ( $C_{Amfz}$ ,  $C_{Amrz}$ ,  $C_{Acfz}$ ,  $C_{Acrz}$ ,  $C_{Akfz}$ ,  $C_{Akrz}$ ) に加え、リヤに関しては、一次遅れ係数 ( $T_{rz}$ ) も用い、式(12) のように定義して定式化を行った。

$$\frac{C_{Afz}(s)}{z_x^*(s)} = C_{Amfz}s^2 + C_{Acfz}s + C_{Akfz} , \quad \frac{C_{Arz}(s)}{z_x^*(s)} = \frac{C_{Amrz}s^2 + C_{Acrz}s + C_{Akrz}}{T_{rz}s + 1} \quad (12)$$

$\frac{C_{Afz}(s)}{z_x^*(s)}, \frac{C_{Arz}(s)}{z_x^*(s)}$  : 上下運動に対する空気力の応答関数(フロント, リヤ)

$C_{Amfz}, C_{Amrz}, C_{Acfz}, C_{Acrz}, C_{Akfz}, C_{Akrz}$ :

上下運動に対する空気イナータ, ダンピング, ばね係数(フロント, リヤ)

$T_{rz}$  : 空気力一次遅れ係数(上下運動時のリヤのみ)

上下運動時の突起有り無しを比較を、空気力応答関数として FIG. 2.18 に示す。フロントの空気力応答には、突起有り無しは差はなく、ともに空気ダンピングとして作用している(ゲインが高周波へ徐々に大きく、位相は  $-90^\circ$  近辺)。上下運動速度により相対的に流れが加速するためと考えられ、上下速度に対し戻す力が働いてい

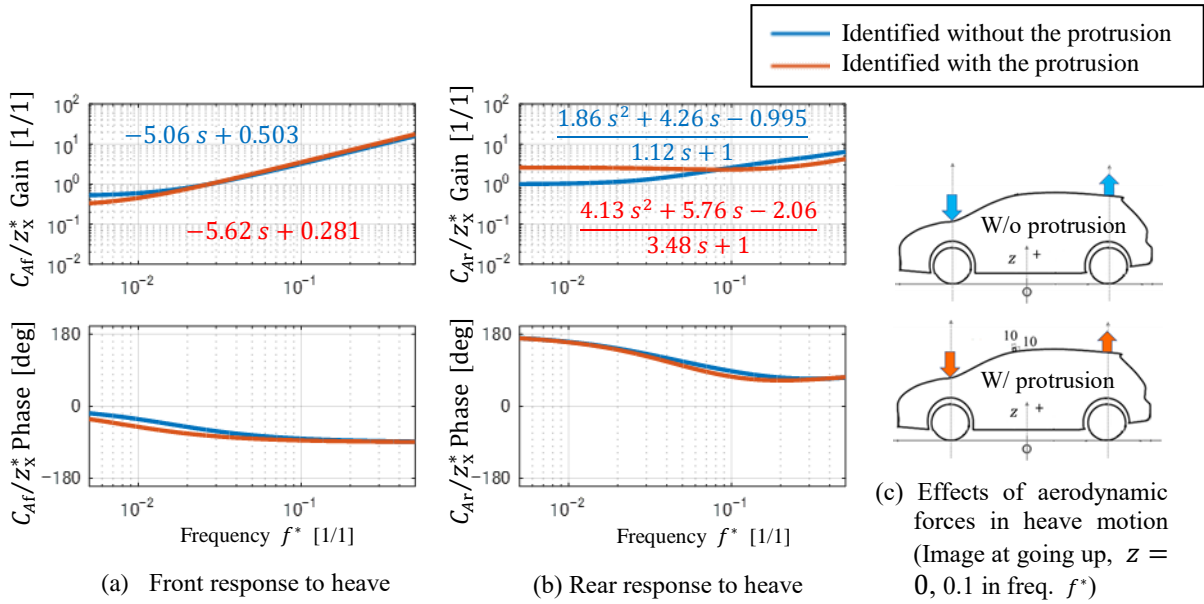


FIG. 2.18 Normalized identified response functions of aero forces by pitch and heave motion, in comparing models without and with the protrusion.

る(空気ダンピング係数が負である)。一方、リア応答は、同定された空気力応答関数の係数を参照すると、上下運動を戻す方向の空気イナータ・ばねの力と、促進する方向の空気ダンピングの力が同時に働いていると考えられる。また、一次遅れも働くため、結果として周波数によるゲイン変化は小さなっている。位相は  $180^\circ$  から  $90^\circ$  までに収まっており、高周波では空気ダンピングの効果が主であると考えられる。突起有り無しと比較では、若干の差が見られ、突起無しは、高周波へ向かってゲインが増加しており、空気ダンピングの効果が見られる。突起有りは、低周波のゲインが大きくなり、位相の遅れがやや大きくなっているのが見られ、空気ばねと一次遅れの影響が比較上大きいことが確認できる。突起による乱れによって、空気ダンピングの効果が小さくなった影響だと考えられる。FIG. 2.18 (c)に、空気力の発生の概略図を示す。無次元周波数が  $0.1$  (実車  $60 \text{ km/h}$  走行で約  $0.4 \text{ Hz}$  相当)で、上下運動で上向き速度が最大の状態を示しているが、フロントが下向き・リアは上向きの空気力が発生することになる。その結果、上下加振によりピッチ運動を誘起する空気力が発生することになるが、低周波では突起有りの方がピッチが大きく誘起され、高周波では突起無しの方がピッチが大きく誘起されると推測される。



### 2.3.3. 空気力応答の定式化まとめ

以上のように、非定常空気力応答の形状差による違い、上下・ピッチ加振での違いを計測することができ、その違いを空気イナータ・ダンピング・ばね、および一次遅れによって表現できることが確認できた。今回計測を行ったケースの空気力応答関数を TABLE 2.1 に示す。これらの結果は、運動で発生する非定常空気力に着目することで、今まで違いとして捉えられなかった空気力の差を、定量的に表現できるようになったことを示している。

ピッチ運動に対するフロントの空気力は、その係数の大きさから空気ばね項( $C_{Akf\theta}$ )が主体であり、正符号であることから、正のピッチ角(前上がり)に対し上向きの空気力が発生し、ピッチ角を助長する方向となっている。ピッチ運動に対するリヤ空気力では、突起無しの場合の空気イナータ係数が( $C_{Amr\theta}$ )が大きく負符号となっており、正のピッチ加速度(ピッチ角としては負、前下がり)の時、リヤに下向きの空気力を発生しピッチを戻す力となっている。ただし、加速度比例の力であるため、車両質量を減らす効果として捉えることができ、結果ピッチ運動を大きくする効果になると考えられる。突起有りでは、その空気イナータ項は小さくなり、相対的に空気ダンピング項( $C_{Acr\theta}$ )が大きくなっている。その空気ダンピング係数は正符号であるので、ピッチ速度を減らすダンパとして捉えられ、ピッチ角を小さくすると考えられる。

上下運動に対するフロントの空気力は、空気ダンピング項( $C_{Acfz}$ )が主体であり、負符号であることから、上下速度に対し下向きの力が働くことになり、上下運動を抑制することになる。上下運動に対するリヤの空気力は、

TABLE 2.1 Normalized identified response function coefficients of aero forces by pitch and heave motion for the model without and with the protrusion.

	Front aerodynamic response	Rear aerodynamic response
Pitch coefficient	$\frac{C_{Af\theta}(s)}{\theta(s)} = C_{Amf\theta}s^2 + C_{Acf\theta}s + C_{Akf\theta}$	$\frac{C_{Ar\theta}(s)}{\theta(s)} = C_{Amr\theta}s^2 + C_{Acr\theta}s + C_{Akr\theta}$
Without the protrusion	0.920 s + 3.98	-11.6 s <sup>2</sup> + 1.19 s - 0.519
With the protrusion	0.488 s + 3.85	-0.632 s <sup>2</sup> + 2.17 s - 1.06
Heave coefficient	$\frac{C_{Afz}(s)}{z^*(s)} = C_{Amfz}s^2 + C_{Acfz}s + C_{Akfz}$	$\frac{C_{Arz}(s)}{z^*(s)} = \frac{C_{Amrz}s^2 + C_{Acrz}s + C_{Akrz}}{T_{rz}s + 1}$
Without the protrusion	-5.06 s + 0.503	$\frac{1.86 s^2 + 4.26 s - 0.995}{1.12 s + 1}$
With the protrusion	-5.62 s + 0.281	$\frac{4.13 s^2 + 5.76 s - 2.59}{3.48 s + 1}$



各項が合わさった空気力となっており, 正の空気イナータ( $C_{Amrz}$ )での質量増加効果, 正の空気ダンピング( $C_{Acrz}$ )でのダンピング増加効果, 負の空気ばね( $C_{Akrz}$ )によりばね力の減少効果が働いていることがその係数から確認できる. よって, 低周波では上下動を助長し, 高周波になるに従い抑制へ移っていくと考えられる. さらに, 一次遅れ( $T_{rz}$ )が働いているが, 突起有りではその係数値が大きく, 応答遅れが大きいことが確認できる. このように, 上下運動に対するリヤ空気力は各項の影響が重なった複雑な結果となっているが, 上下運動による相対速度変化とともに, フロントでの流れ変化の影響が遅れを伴って入力されるためと考えられる.

## 2.4. 空気力応答関数の検証

運動により発生する空気力応答を定式化することができたので、その妥当性の検証を行った。模型加振試験で得られる荷重応答を予測シミュレーションで求め、実際の加振試験で得られた結果と比較した。加振試験で得られる荷重は、模型慣性力と空気力の合力であり、式(13), (14)のように表される。(前述のとおり、空気付加質量の影響は省く。)

$$R_f'' = -m_f \ddot{z}_{xf} + A_f = -m_f \ddot{z}_{xf} \left( \frac{l_{wb}}{2} \ddot{\theta}_x + \ddot{z}_x \right) + A_f \quad (13)$$

$$R_r'' = -m_r \ddot{z}_{xr} + A_r = -m_r \ddot{z}_{xr} \left( -\frac{l_{wb}}{2} \ddot{\theta}_x + \ddot{z}_x \right) + A_r \quad (14)$$

空気力( $A_f, A_r$ )は、動圧( $D = 1/2 \rho U^2$ )、前面投影面積( $S$ )、および周波数変換比( $L/ U$ )を与えることにより、ここまで求めた無次元空気力係数から式(15), (16)のように求められる。

$$A_f = A_{f\theta} + A_{fz}$$

$$A_{f\theta} = m_{f\theta} \ddot{\theta}_x + c_{f\theta} \dot{\theta}_x + k_{f\theta} \theta_x = \frac{1}{2} \rho U^2 S \left( C_{Amf\theta} \left( \frac{L}{U} \right)^2 \ddot{\theta}_x + C_{Acf\theta} \frac{L}{U} \dot{\theta}_x + C_{Akf\theta} \theta_x \right)$$

$$A_{fz} = m_{fz} \ddot{z}_x + c_{fz} \dot{z}_x + k_{fz} z_x = \frac{1}{2} \rho U^2 S \left( \frac{C_{Amfz}}{L} \left( \frac{L}{U} \right)^2 \ddot{z}_x + \frac{C_{Acfz}}{L} \frac{L}{U} \dot{z}_x + \frac{C_{Akfz}}{L} z_x \right) \quad (15)$$

$$A_r = A_{r\theta} + A_{rz}$$

$$A_{r\theta} = m_{r\theta} \ddot{\theta}_x + c_{r\theta} \dot{\theta}_x + k_{r\theta} \theta_x = \frac{1}{2} \rho U^2 S \left( C_{Amr\theta} \left( \frac{L}{U} \right)^2 \ddot{\theta}_x + C_{Acr\theta} \frac{L}{U} \dot{\theta}_x + C_{Akr\theta} \theta_x \right)$$

$$T_{rz} \frac{L}{U} \dot{A}_{rz} + A_{rz} = m_{rz} \ddot{z}_x + c_{rz} \dot{z}_x + k_{rz} z_x = \frac{1}{2} \rho U^2 S \left( \frac{C_{Amrz}}{L} \left( \frac{L}{U} \right)^2 \ddot{z}_x + \frac{C_{Acrz}}{L} \frac{L}{U} \dot{z}_x + \frac{C_{Akrz}}{L} z_x \right) \quad (16)$$

式(13), (14) および式(15), (16)を用いることで、風洞での模型加振試験で得られるピッチ・上下加振時の荷重を予測することができる(FIG. 2.19)。検証は、ピッチ・上下の混合した運動モードで、リヤ上下入力をフロントに対し90°の位相遅れをつけ、1.6 Hz、振幅 ±2.5 mmで行った。加振変位入力は、式(17), (18)で表される。

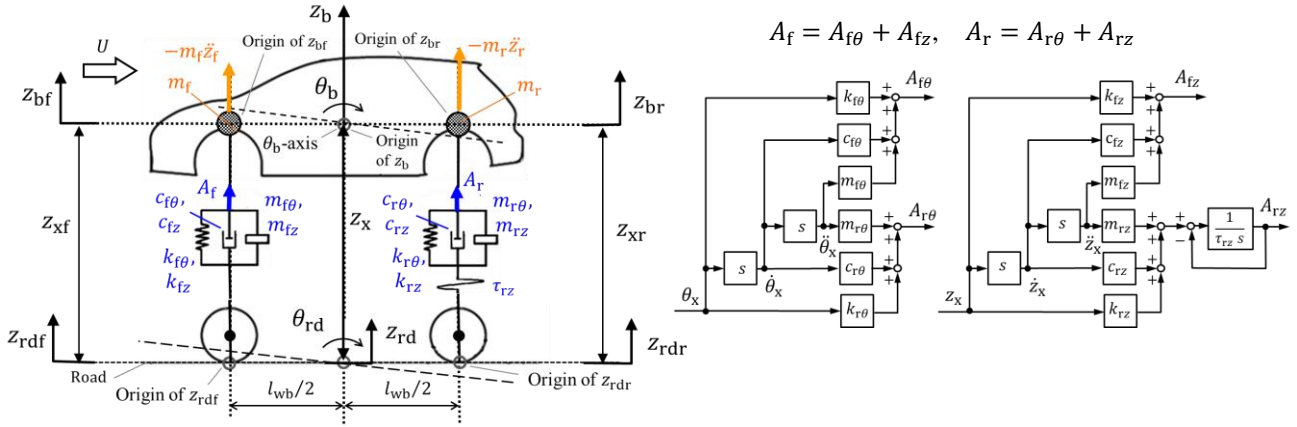


FIG. 2.19 Definition of the aero-coefficients of aero-inerter, aero-damping, and aero-spring by pitch and heave motion.

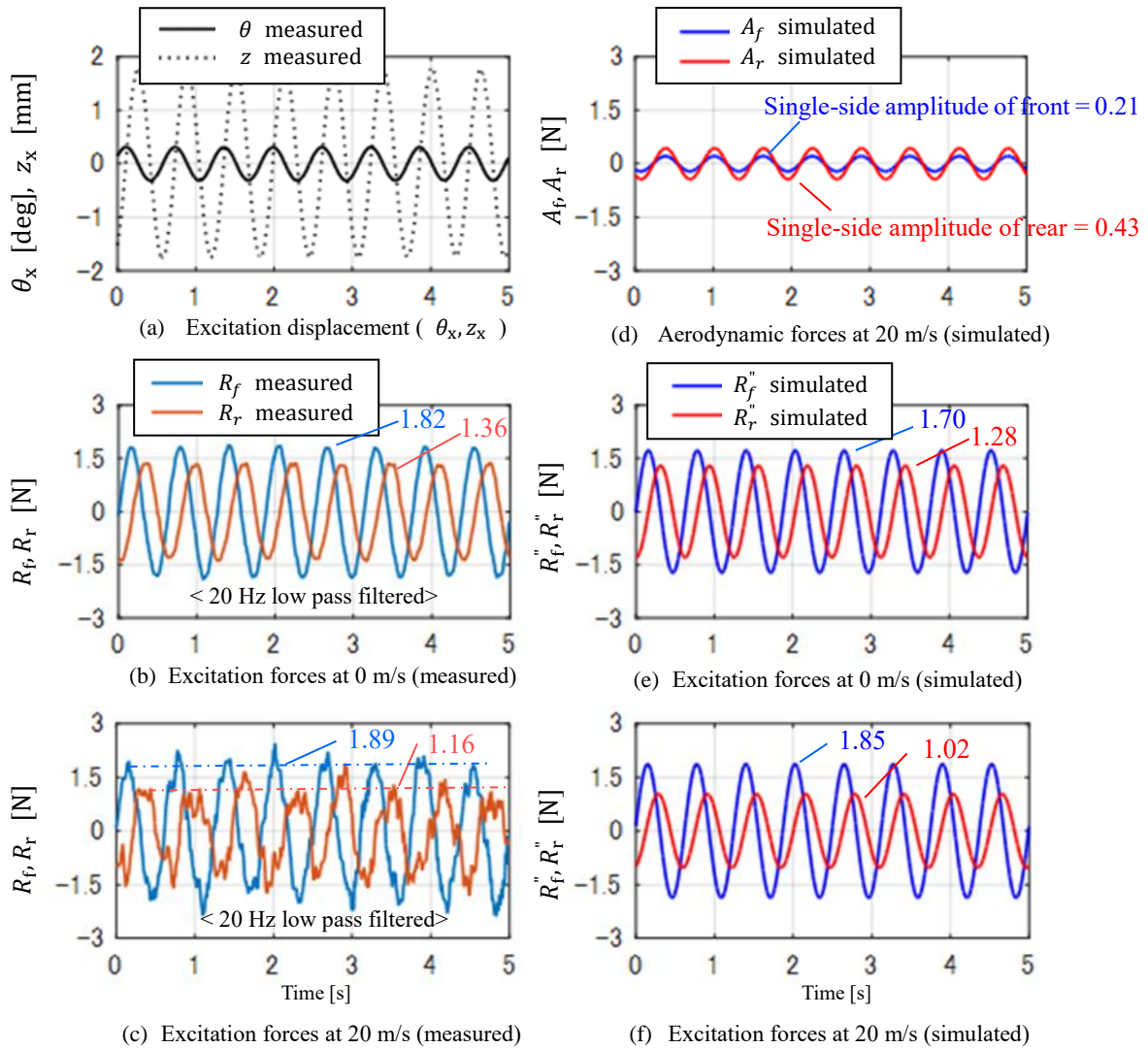


FIG. 2.20 Comparison between experimental measured forces and that by simulation results of the front and rear at 0 m/s and 20 m/s on the model without the protrusion, in an excitation mode when the rear heave displacement has the delay of 90 degrees to the front heave displacement at 1.6 Hz and 2.5mm amplitude. (Single-side amplitude values of forces are shown in figures.)

$$z_{xf} = Amp \cdot \sin(2\pi f \cdot t), \quad z_{xr} = Amp \cdot \sin\left(2\pi f \cdot t - \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{at } Amp = 2.5 \times 10^{-3} \text{ [m]} \quad (17)$$

$$\theta_x = \frac{z_{xf} - z_{xr}}{l_{wb}}, \quad z_x = \frac{z_{xf} + z_{xr}}{2} \quad (18)$$

この運動モードにおいて、突起無し形状の風速 0 m/s と 20 m/s について、定式化からの予測結果と実験計測結果の比較を行った。比較結果を、時系列波形で FIG. 2.20 に示す。

式(17), (18)によるピッチ角 ( $\theta_x$ ), 上下変位( $z_x$ )の同時入力の加振波形は FIG. 2.20 (a)であり、風洞での加振実験で得られた、風速 0 m/s でのフロント/リヤ荷重が(b), 風速 20 m/s での荷重が(c)であった。それに対して、定式化からの予測で得られた風速 0 m/s での荷重が(e), 風速 20 m/s での荷重が(f)となる。風速 20 m/s での空気力のみを予測したのも(d)に示している。実験結果(b), (c)に対し、予測結果(e), (f)は荷重振幅がやや小さくなってはいるが、風速 0 m/s から 20 m/s への荷重振幅変化を見ると、フロントは増加しリヤは減少する傾向が一致しているのが確認できる。また、フロント/リヤの発生空気力(d)は、ほぼ位相差が無く発生しているが、フロント/リヤの上下運動の位相差のため、荷重に対してはフロント/リヤで逆転して作用していることが、予測結果から理解できる。

以上、定式化からの予測結果と実験計測結果は対応しており、今回の空気力の定式化が適切であることが確認できた。さらに、上下・ピッチの混合する運動に対しても適用可能であることが、合わせて確認できた。

## 2.5. まとめ

風洞での模型加振試験を実施し、運動によって発生する非定常空気力を計測し、以下の結果を得た。

- 実際の車両形状について、運動によって発生する非定常空気力の発生を確認し、空気力応答関数として定式化することができた。
- 空気力応答関数は、上下運動とピッチ運動で発生する空気力に分けて表現でき、それぞれ空気イナータ・ダンピング・ばね、および1次遅れで表現することが必要であることが確認できた。  
(特に、1次遅れの考慮も必要である知見は、先行研究では見られなかった結果である)
- 細部形状(突起)による非定常空気力の変化を、応答関数により定量的に示すことができた。

今回の車両形状では、

- ◆ 運動で発生する空気力応答関数は、以下の範囲の考慮で定式化できた。
  - 【ピッチ運動:フロント】 空気ダンピング・ばね
  - 【ピッチ運動:リヤ】 空気イナータ・ダンピング・ばね
  - 【上下運動:フロント】 空気ダンピング・ばね
  - 【上下運動:リヤ】 空気イナータ・ダンピング・ばね、さらに一次遅れ
- ◆ 細部形状(突起)による空気力応答関数の違いは、以下となった。(フロントの差はほぼ無し)
  - 【突起 無し】 ピッチ運動: リヤイナータ大 (戻す方向), 影響大  
上下運動: リヤダンピング大 (促進方向)
  - 【突起 有】 ピッチ運動: リヤイナータ小, 正のリヤダンピング大 (促進方向)  
上下運動: リヤダンピング小, リヤばね大(促進方向), 一次遅れ大

# 3. 路面入力時の車両運動に与える非定常空気力の影響 解析

## 3.1. 非定常空気力を考慮した運動応答関数の導出

### 3.1.1. 空気力を考慮した路面入力時の運動方程式

ピッチ・上下運動で発生する非定常空気力の影響を車両運動の変化として捉えるため、空気力を作用させた車両運動の運動方程式を考えた。実際の走行では、車両ボデーが自ら運動を起こすわけではなく、路面入力により起こされるものであり、最初にフロント車軸の上下変位が起こると、ホイールベース分の遅れの後リヤ車軸の上下変位が起こるため、ピッチ・上下運動が同時に発生する運動となる。その入力を考えたの車両運動を対象とし、非定常空気力の影響を確認した。Kojima らの検討にならない、路面入力と空気力の作用を考えた運動方程式を用いた (Kojima et al., 1996)。

車両サスペンションとしてフロント/リヤにダンパとばねを持つピッチ・上下の連立した2自由度の縦運動に対し、フロント/リヤ車軸に上下空気力が働くモデルを考え、FIG. 3.1 のように定義した。フロント/リヤの車軸位置での車体ボデー上下変位 ( $z_{bf}$ ,  $z_{br}$ )、路面入力変位 ( $z_{rdf}$ ,  $z_{rdr}$ )、サスペンション変位 ( $z_{xf}$ ,  $z_{xr}$ ) を考え、サスペンション変位に対し車両ばね ( $k_f$ ,  $k_r$ )・ダンパ ( $c_f$ ,  $c_r$ ) のサスペンション力 ( $S_f$ ,  $S_r$ ) が働く (ここでの  $k_f$ ,  $k_r$ ,  $c_f$ ,  $c_r$  は、1

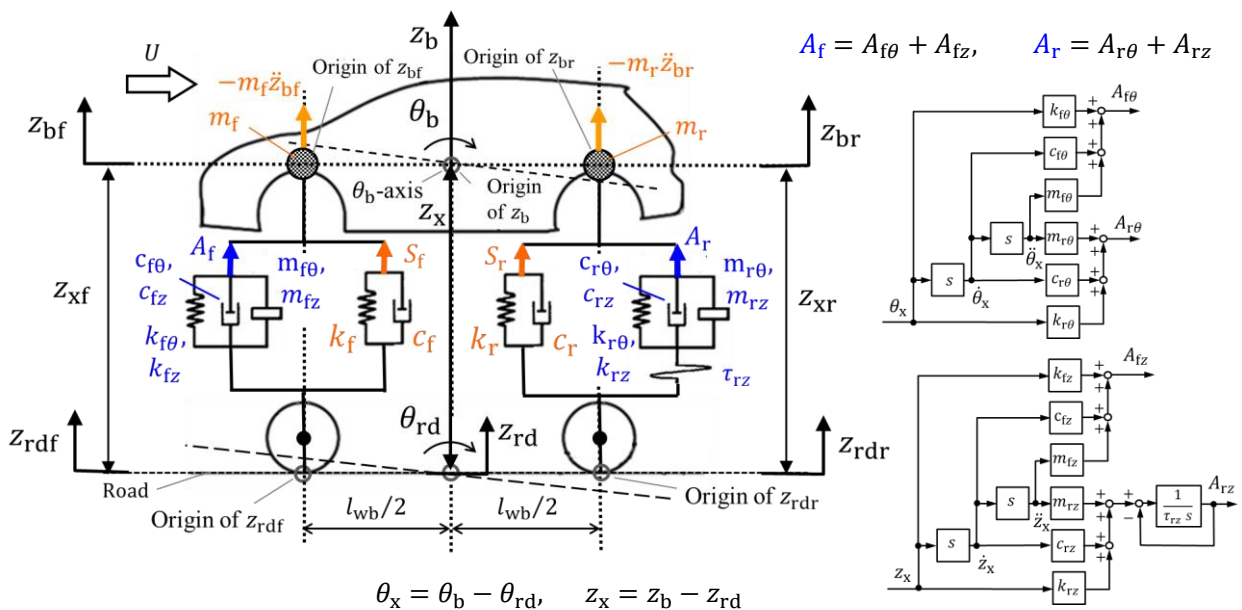


FIG. 3.1 Definition of variables at the vehicle motion model of the pitch and heave motions with the vehicle suspension and unsteady aerodynamic forces

輪分のばね, ダンピング係数を表す). 慣性力はフロント/リアの車軸にかかる質量 ( $m_f, m_r$ ) と車体ボデー上下加速度 ( $\ddot{z}_{bf}, \ddot{z}_{br}$ ) で発生するとし, 空気力 ( $A_f, A_r$ ) がそれぞれフロント/リア車軸位置でサスペンションと並列に働くとした. (今回の解析に使用する実車両の各諸元定数は, 記号一覧の中に記す.) 運動として解析対象とする周波数領域は, 実車スケールで 0.2~2.0 Hz の範囲で考える. これは, 車両ボデーの縦運動の安定性に対しては, その共振周波数前後から低周波が重要であると考えており, この範囲とした. それ以上の周波数の運動は, ボデー変位としてはほとんどなくなり, 振動として感じられるものとなる. タイヤばねの考慮については, その共振周波数は高く, ここでの対象領域からは外れるため, 単純化のため考慮しないこととした.

運動方程式は, ピッチ・上下動の2自由度のピッチモーメントと上下力のつり合いから, 式(19)のように表される. フロント/リア車軸位置でのサスペンション変位 ( $z_{xf}, z_{xr}$ ) は, ボデー上下変位 ( $z_{bf}, z_{br}$ ) の路面入力変位 ( $z_{rdf}, z_{rdr}$ ) の差であり, 車体ボデーの路面に対する相対ピッチ角度 ( $\theta_x$ ), 相対変位 ( $z_x$ ) としても表すことができる(式(20)). 路面入力はフロント路面変位 ( $z_{rdf}$ ) を基準の入力として与え, リヤ路面変位 ( $z_{rdr}$ ) は式(21)で示すように, 車速 ( $U$ ) と車両ホイールベース ( $l_{wb}$ ) で決まる遅れ時間 ( $\tau_{wb} = l_{wb}/U$ ) の差を持って入力されるとした.

$$\begin{bmatrix} m_f \frac{l_{wb}}{2} & -m_r \frac{l_{wb}}{2} \\ m_f & m_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{z}_{bf} \\ \ddot{z}_{br} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2c_f \frac{l_{wb}}{2} & -2c_r \frac{l_{wb}}{2} \\ 2c_f & 2c_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{z}_{xf} \\ \dot{z}_{xr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2k_f \frac{l_{wb}}{2} & -2k_r \frac{l_{wb}}{2} \\ 2k_f & 2k_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_{xf} \\ z_{xr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{l_{wb}}{2} & -\frac{l_{wb}}{2} \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_f \\ A_r \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$\begin{bmatrix} z_{xf} \\ z_{xr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_{bf} \\ z_{br} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} z_{rdf} \\ z_{rdr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{wb}/2 & 1 \\ -l_{wb}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_x \\ z_x \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$z_{rdr}(t) = z_{rdf}(t - \tau_{wb}) \quad (21)$$

初期値を 0 としたラプラス変換表記で表すと, 式(19), (20), (21)は, それぞれ式(22), (23), (24)となる.

$$\begin{bmatrix} m_f s^2 & -m_r s^2 \\ m_f s^2 & m_r s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{z}_{bf}(s) \\ \hat{z}_{br}(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2c_f s + 2k_f & -2c_r s - 2k_r \\ 2c_f s + 2k_f & 2c_r s + 2k_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{z}_{xf}(s) \\ \hat{z}_{xr}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{A}_f(s) \\ \hat{A}_r(s) \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{z}_{xf}(s) \\ \hat{z}_{xr}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{z}_{bf}(s) \\ \hat{z}_{br}(s) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{z}_{rdf}(s) \\ \hat{z}_{rdr}(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_{wb}/2 & 1 \\ -l_{wb}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$\hat{z}_{rdr}(s) = e^{-s\tau_{wb}} \cdot \hat{z}_{rdf}(s) \quad (24)$$

### 3.1.2. 非定常空気力の入力

式(19)の運動方程式の空気力項( $A_f, A_r$ )に、運動によって発生する非定常空気力を入力することで、運動と空気力を連成させた解析が可能となる。非定常空気力は、ピッチ角運動に対して発生するフロント空気力( $A_{f\theta}$ )／リヤ空気力( $A_{r\theta}$ )、および、上下変位運動に対して発生するフロント空気力( $A_{fz}$ )／リヤ空気力( $A_{rz}$ )の足し合わせとして、入力される(FIG. 3.1)。流れ変化の観点から、車体ボデーと路面の相対ピッチ角度( $\theta_x$ )、相対変位( $z_x$ )に対応して空気力が発生すると捉え、その相対角・変位に対する応答関数として表す。(車体ボデーと路面の間の空間変化による流体の流量・流速・受風面積の変化が非定常空気力を発生させており、その両者の相対角・変位に対して流れが応答するのが妥当と考えられる。) よって空気力( $A_f, A_r$ )は、ラプラス変換表記で式(25)のように表すことができる。運動によって発生する非定常空気力を、ピッチ・上下運動の加速度・速度・変位に比例して発生する空気イナータ、空気ダンピング、空気ばねとして定式化し、上下運動に対するリヤ空気力( $A_{rz}$ )の応答については、一次遅れの考慮( $\tau_{rz}, T_{rz}$ )も必要として加えている。

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \hat{A}_f(s) \\ \hat{A}_r(s) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \hat{A}_{f\theta}(s) & \hat{A}_{fz}(s) \\ \hat{A}_{r\theta}(s) & \hat{A}_{rz}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_{f\theta}s^2 + c_{f\theta}s + k_{f\theta} & m_{fz}s^2 + c_{fz}s + k_{fz} \\ m_{r\theta}s^2 + c_{r\theta}s + k_{r\theta} & \frac{m_{rz}s^2 + c_{rz}s + k_{rz}}{\tau_{rz}s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{2}\rho U^2 S \begin{bmatrix} C_{Amf\theta} \left(\frac{L}{U}\right)^2 s^2 + C_{Acf\theta} \frac{L}{U} s + C_{Akf\theta} & \frac{C_{Amfz}}{L} \left(\frac{L}{U}\right)^2 s^2 + \frac{C_{Acfz}}{L} \frac{L}{U} s + \frac{C_{Akfz}}{L} \\ C_{Amr\theta} \left(\frac{L}{U}\right)^2 s^2 + C_{Acr\theta} \frac{L}{U} s + C_{Akr\theta} & \frac{C_{Amrz}}{L} \left(\frac{L}{U}\right)^2 s^2 + \frac{C_{Acrz}}{L} \frac{L}{U} s + \frac{C_{Akrz}}{L} \\ & \frac{\tau_{rz} L}{T_{rz} U} s + 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} \quad (25) \end{aligned}$$

式(25)の中の、 $m_{**}, c_{**}, k_{**}, \tau_{rz}$  で表される係数は、車速、空気密度、面積、車長を定めた場合の実車両での有次元空力係数で、空気イナータ、空気ダンピング、空気ばね、一次遅れ時間を示している。 $C_{Am**}, C_{Ac**}, C_{Ak**}, T_{rz}$  で表された係数は無次元空力係数であり、動圧( $D=1/2\rho U^2$ )、モデル前面投影面積( $S$ )、モデル車長( $L$ )、車長に対する風速比( $U/L$ )で無次元化されたものである。(添え字は、 $m$ : イナータ、 $c$ : ダンピング、 $k$ : ばね、 $f$ : フロント、 $r$ : リヤ、 $\theta$ : ピッチ運動に対する、 $z$ : 上下運動に対する、の意味を示す)。



### 3.1.3. 路面入力時の運動応答関数

ここまでの定式化を用い、運動で発生する非定常空気力を考慮した路面入力に対する運動応答を、伝達関数として整理する。式(22)-(24)で表された運動方程式、および式(25)の非定常空気力応答関数を1つに合わせることで、式(26)となる。

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} m_f s^2 & -m_r s^2 \\ m_f s^2 & m_r s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{wb}/2 & 1 \\ -l_{wb}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_f s^2 & -m_r s^2 \\ m_f s^2 & m_r s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-s\tau_{wb}} \end{bmatrix} \hat{z}_{rdf}(s) \\
& = - \begin{bmatrix} 2c_f s + 2k_f & -(2c_r s + 2k_r) \\ 2c_f s + 2k_f & 2c_r s + 2k_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{wb}/2 & 1 \\ -l_{wb}/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} \\
& \quad + \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{f\theta} s^2 + c_{f\theta} s + k_{f\theta} & m_{fz} s^2 + c_{fz} s + k_{fz} \\ m_{r\theta} s^2 + c_{r\theta} s + k_{r\theta} & \frac{m_{rz} s^2 + c_{rz} s + k_{rz}}{\tau_{rz} s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} \tag{26}
\end{aligned}$$

式(26)は、ピッチ角( $\theta_x$ )、上下変位( $z_x$ )、および路面入力変位( $z_{rdf}$ )の変数のみで表されており、式(27)のように路面入力( $z_{rdf}$ )に対するピッチ角( $\theta_x$ )、上下変位( $z_x$ )応答の関係として整理できる。

$$\begin{aligned}
\hat{M}(s) \begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} & = - \begin{bmatrix} m_f s^2 & -m_r s^2 \\ m_f s^2 & m_r s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-s\tau_{wb}} \end{bmatrix} \hat{z}_{rdf}(s) \\
\hat{M}(s) & := \begin{bmatrix} \hat{M}_{11}(s) & \hat{M}_{12}(s) \\ \hat{M}_{21}(s) & \hat{M}_{22}(s) \end{bmatrix} \\
& = \begin{bmatrix} m_f s^2 + 2c_f s + 2k_f & -m_r s^2 - 2c_r s - 2k_r \\ m_f s^2 + 2c_f s + 2k_f & m_r s^2 + 2c_r s + 2k_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} l_{wb}/2 & 1 \\ -l_{wb}/2 & 1 \end{bmatrix} \\
& \quad - \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{f\theta} s^2 + c_{f\theta} s + k_{f\theta} & m_{fz} s^2 + c_{fz} s + k_{fz} \\ m_{r\theta} s^2 + c_{r\theta} s + k_{r\theta} & \frac{m_{rz} s^2 + c_{rz} s + k_{rz}}{\tau_{rz} s + 1} \end{bmatrix} \tag{27}
\end{aligned}$$

従って、路面入力( $z_{rdf}$ )に対するピッチ角( $\theta_x$ )、上下変位( $z_x$ )の伝達関数は、式(28)のように求められる。

$$\begin{bmatrix} \hat{\theta}_x(s) \\ \hat{z}_x(s) \end{bmatrix} = -\hat{M}(s)^{-1} \begin{bmatrix} m_f s^2 & -m_r s^2 \\ m_f s^2 & m_r s^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-s\tau_{wb}} \end{bmatrix} \hat{z}_{rdf}(s) \tag{28}$$

## 3.2. 運動応答関数での比較

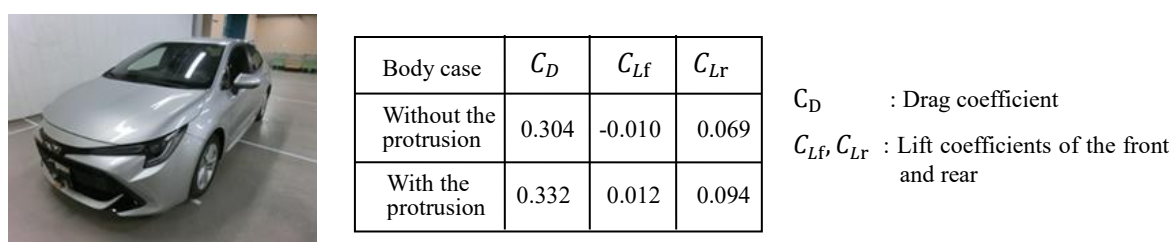
### 3.2.1. 比較形状ケース

非定常空気を考慮した路面入力時の運動応答関数を定式化ができたので、実際の車両での応答関数を求める。模型加振試験で得た無次元非定常空気力係数を用い、実車での非定常空気力に換算し、実車両の諸元を用いて、実車での応答関数を算出した。解析対象の車両は、実在する小型ハッチバック車を用い、流れの乱れを想定した上面ルーフ先端の 40 mm×40 mm の矩形突起を設置し、その有り無しを比較ケースとした。

FIG. 3.2 にその実際の車両形状と、実車での定常空気力係数 ( $C_D$ , および  $C_{Lf}$ ,  $C_{Lr}$ ) を合わせて示す。

### 3.2.2. 実車両の非定常空気力の算出

実際の車両の非定常空気力係数は直接計測することは困難であるため、前章で求めた無次元非定常空気力係数 (TABLE 2.1) を用い、実車両の寸法・車速を与えることで換算を行った。突起有り無しの 2 ケースについて、式 (25) に沿って、実車両の前面投影面積 ( $S$ ), 車長 ( $L$ ), 車速 ( $U$ ) を代入し、ピッチ・上下運動に対する空気力応答関数を求めた。車速は 60 km/h とし、ピッチ角変位に対する空気力応答を FIG. 3.3, 上下変位に対する空気力応答を FIG. 3.4 に示す。算出された各応答関数を図中に数式でも示した。



(a) Target vehicle and the steady-state aerodynamic coefficients for each case



(b) Model shape without the protrusion



(c) Model shape with the protrusion

FIG. 3.2 Tested vehicle shapes, and steady-state aerodynamic coefficients in comparing models without and with the rectangular protrusion of 40 mm × 40 mm on the front roof end.

この車両の非定常空気力は、ピッチ運動に対するリア空気力の発生が最も大きく(FIG. 3.3(b)), 突起の有り無しによる違いも、ピッチ運動に対するリア空気力に大きく差が出ている。突起無しでは応答位相がほぼ 0 であり、ピッチ角前上がり(プラス変位)に対し上向き(プラス方向)のリア空気力が発生し、ピッチ角を戻す方向の空気が働くことがわかる。一方突起有りでは、空気力発生ゲインが小さくなっているのに加え、低周波で応答位

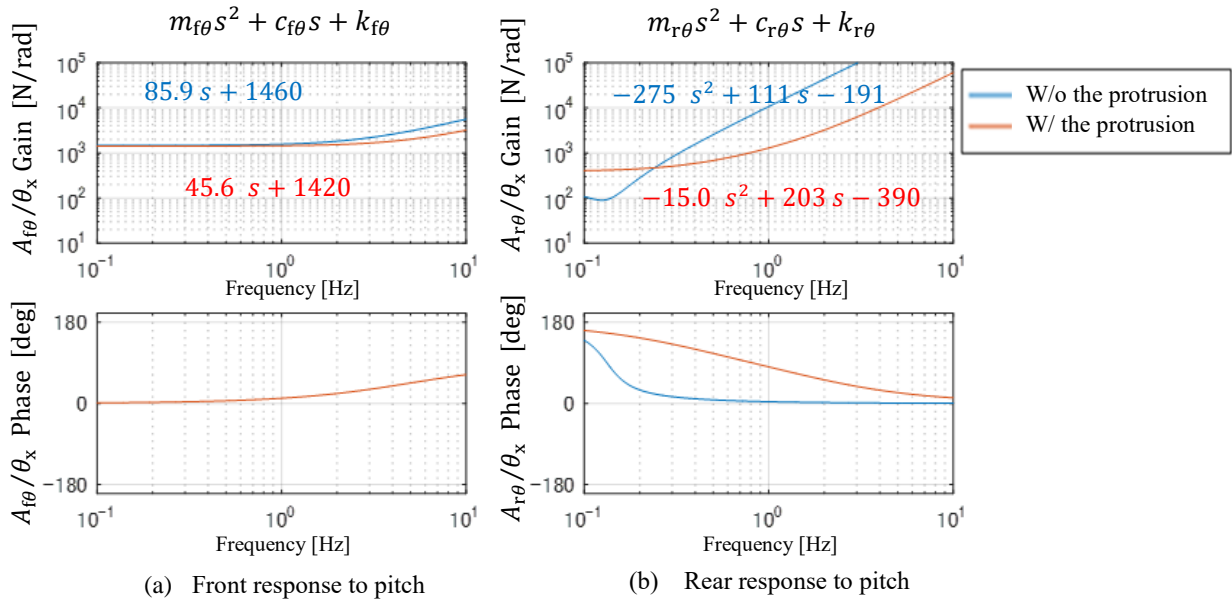


FIG. 3.3 Response functions of aerodynamic forces to pitch motion at 60 km/h on the real vehicle without and with the protrusion.

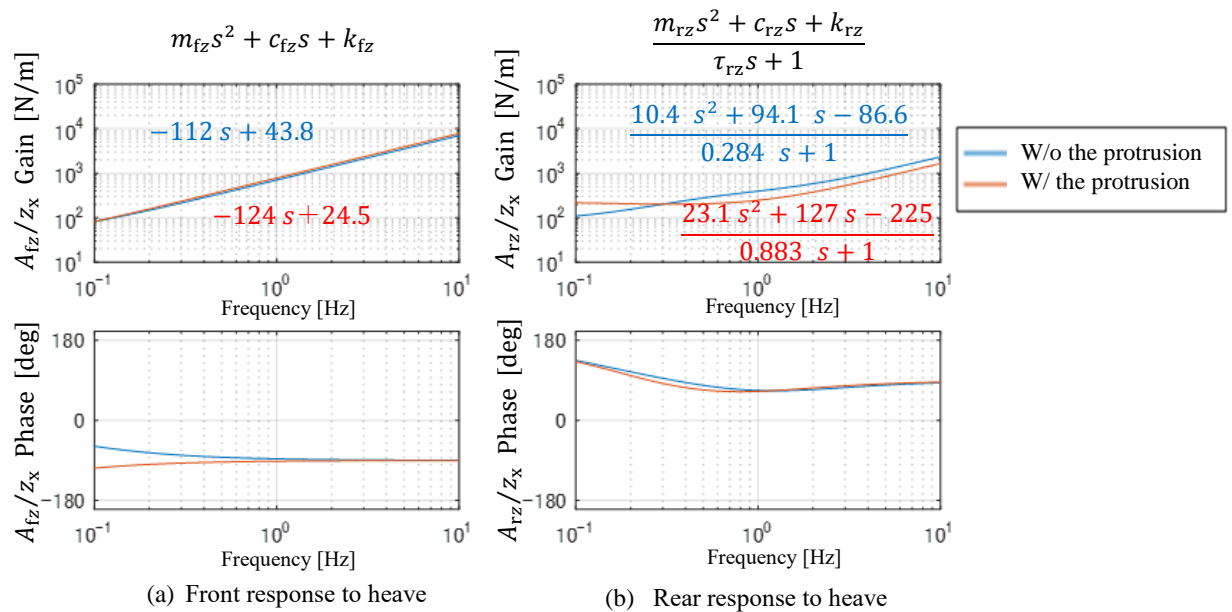


FIG. 3.4 Response functions of the aerodynamic force by heave motion at 60 km/h on the real vehicle without and with the protrusion.

相が  $180^\circ$  に近く、ピッチ角前上がり(プラス変位)に対し下向き(マイナス方向)のリヤ空気力が働き、ピッチ角を助長する方向に空気力が発生している。それが、高周波になるに従って位相が  $0^\circ$  に近づいており、ピッチ角を戻す方向に変化していくことが確認できる。この形状による空気力応答の差が、走行時の運動挙動にどのような影響を与えるかを、この後の解析で示す。

### 3.2.3. 実車両の運動応答関数の算出

式(28)で得られた伝達応答関数はその係数はすべて定数で表されているので、車両諸元のサスペンション係数・車両長さ・車両質量、走行速度、および非定常空気力係数を与えることで、運動応答関数を具体的に求めることができる。60 km/h 走行で、非定常空気力考慮の無い場合、突起有り無しの場合の3ケースについて、非定常空気力を考慮した路面入力に対する運動応答関数を算出した。FIG. 3.5, FIG. 3.6 に路面入力( $z_{rd}$ )に対するピッチ角( $\theta_x$ )、上下変位( $z_x$ )の応答を示す。FIG. 3.6 は、共振周波数前後の範囲を拡大して示したものである。得られた伝達応答関数は、いずれのケースも不安定極は存在しないことを確認している。

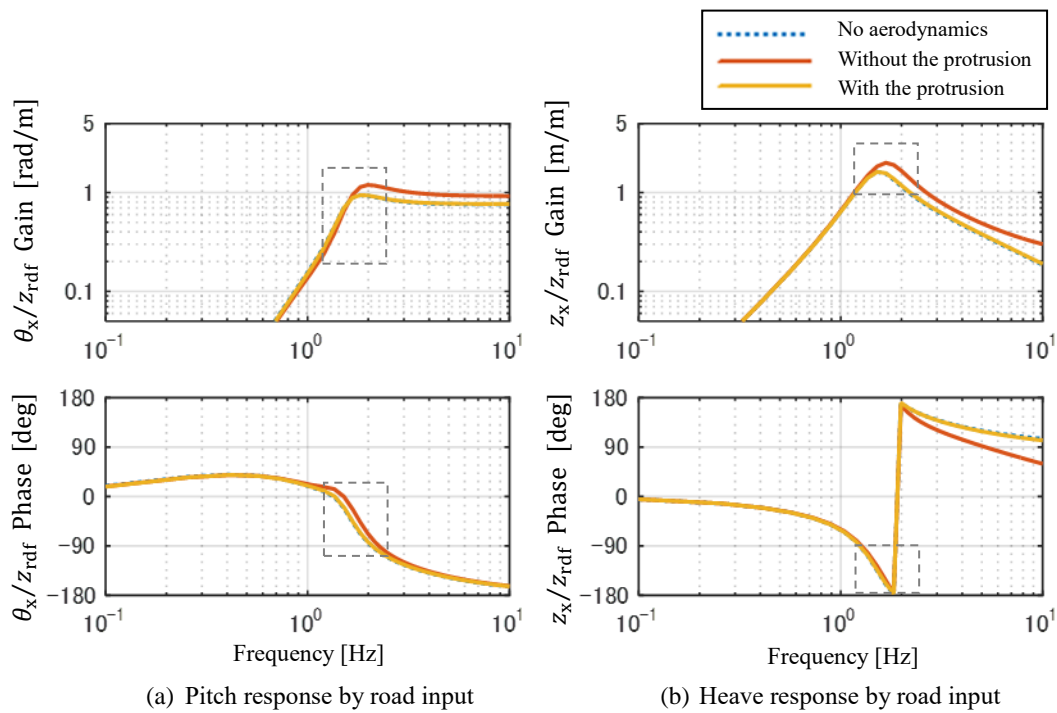


FIG. 3.5 Transfer functions of the vehicle motion response ( $\theta_x, z_x$ ) in the road input considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect.

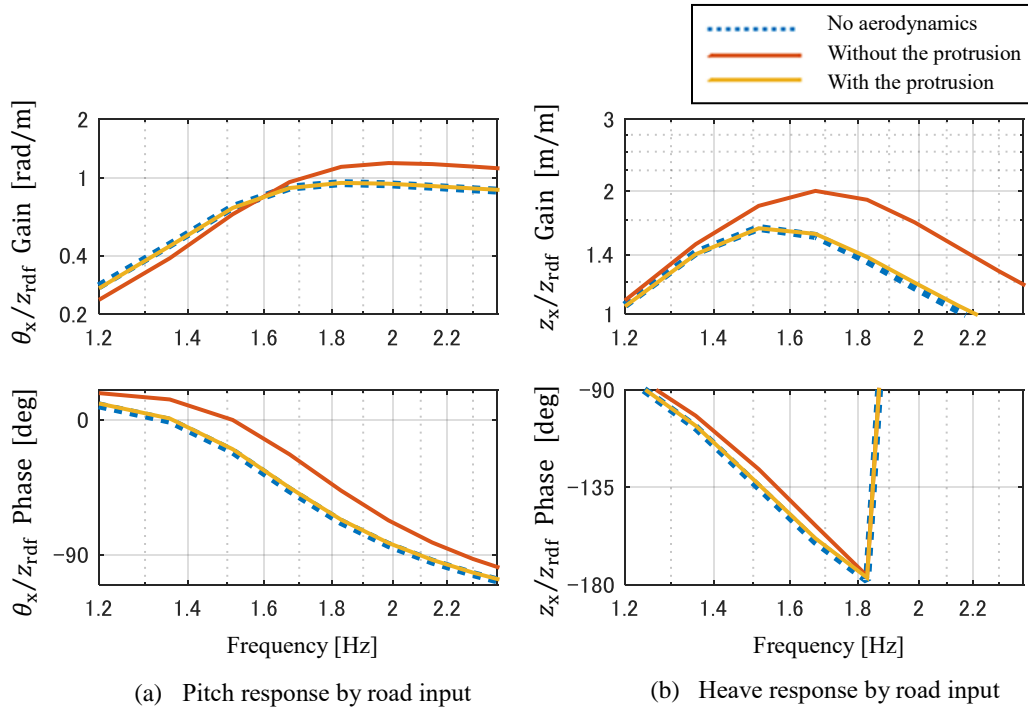


FIG. 3.6 Transfer functions of the vehicle motion response ( $\theta_x, z_x$ ) in the road input considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect (Scoped from FIG. 3.5).

FIG. 3.5, 3.6 において、非定常空気力考慮が無い場合と突起有りの差はわずかに見られる程度だが、突起無しは、応答ゲインおよび位相に大きな違いが見られる。その違いは、ピッチ運動に対するリヤ空気力 ( $A_{r\theta}/\theta_x$ , FIG. 3.3 (b)) で発生している。1 Hz 以上での空気力応答ゲインが、突起無しでは  $10^4$  (N/rad) 以上であるのに対し、突起有りでは  $10^3$  (N/rad) 程度に減少しており、それが運動応答の差として大きく表れている。突起無しの場合は、変位を押し戻す空気力が働き、サスペンションの反発力と合わさり、リヤの運動を助長(ゲインが増加)している。突起有りの場合は、その空気力の発生が減少し、位相のずれも生じるため、運動への影響が大きく減少する結果となっている。流れの乱れによって流れ応答が弱くなり、発生する非定常空気力(ここでは加速度に比例して発生する空気力)が減少したと考えられる。

また、ピッチ運動応答( $\theta_x/z_{rdf}$ )において、突起無しは突起有りに比べ 1.6 Hz 以下ではゲインが小さく、それ以上では大きくなっており、入力周波数によってその大小関係が逆転している。上下運動応答( $z_x/z_{rdf}$ )においては、突起無しは突起有りに比べ、約 1.2 Hz 以上の周波数でゲインが大きくなっていることが確認できる。そこで、路面入力に対するフロント/リヤの上下運動応答( $z_{xf}/z_{rdf}, z_{xr}/z_{rdf}$ )に分けて示してみると(FIG. 3.7, および拡大して示した FIG. 3.8), それらの変化が、ほぼリヤの上下運動応答で発生していることがわかる。

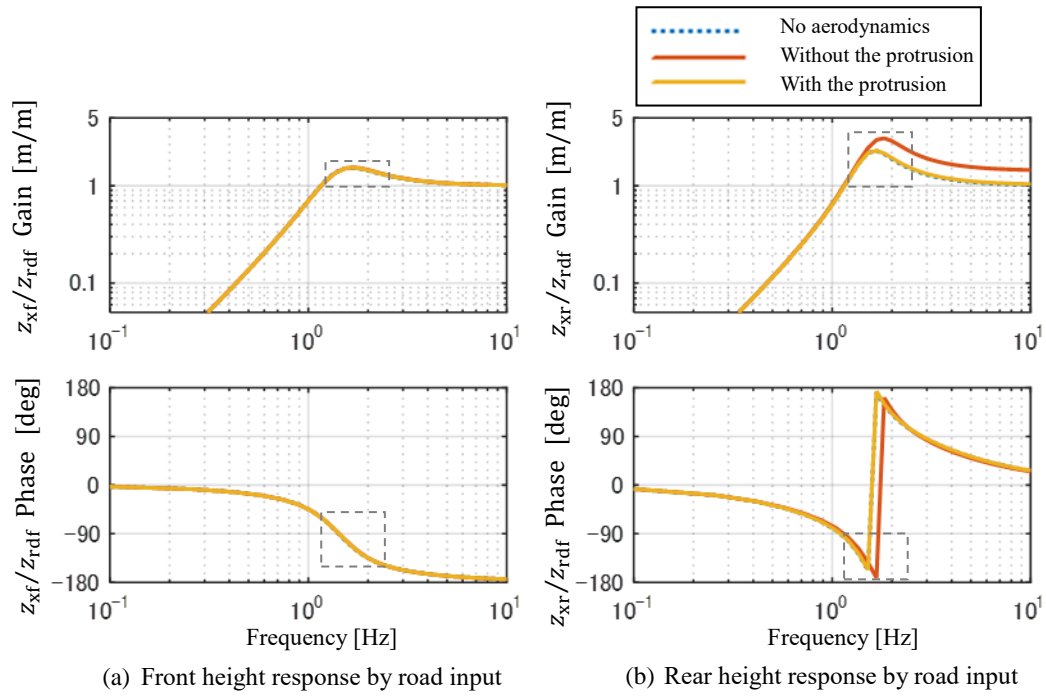


FIG. 3.7 Transfer functions of the vehicle motion response ( $z_{xf}$ ,  $z_{xr}$ ) in the road input considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect.

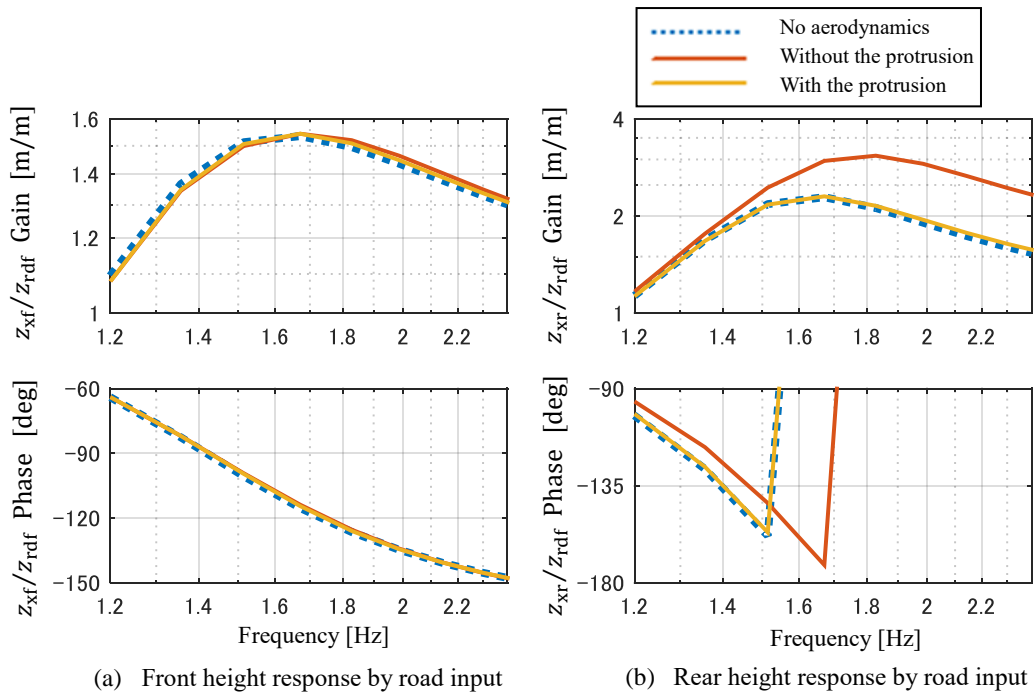


FIG. 3.8 Transfer functions of the vehicle motion response ( $z_{xf}$ ,  $z_{xr}$ ) in the road input considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect (Scoped from FIG. 3.7).

リヤ上下運動応答において、突起無しのゲインピーク周波数が高く、ピーク値も大きく、位相遅れが小さい。さらに、突起有りに対し、どの周波数においてもゲインが大きく逆転することはないことから、ピッチ運動応答で逆転する現象があるのは、サスペンションで決まる上下運動の大小関係が、周波数によってフロントとリヤで入れ替わるためであることがわかる。(1.6 Hz 以下ではフロント上下運動がリヤより大、1.6 Hz 以上ではフロントがリヤより小のため、リヤ空気力の効果がピッチ運動に対しては逆転する。)

以上、運動応答関数での比較から、形状違いによる非定常空気力の変化は、路面入力に対する運動応答を変化させるのに十分な影響度を持っていることが確認できた。さらに、路面入力周波数の違いにより、運動への影響が逆転することもあることから、路面入力と車両サスペンション特性を同時に考えた非定常空気力の解析が必要であることを確認できた。

### 3.3. 運動挙動シミュレーションでの比較

#### 3.3.1. ステップ路面応答での運動挙動比較

式(28)で得られた運動応答関数を用いた時系列シミュレーションを行うことで、具体的な路面入力において、非定常空気力の運動への影響を確認した。まず、段差乗り越えを想定したステップ路面入力(路面段差 20 mm, 車速 60 km/h)での結果を示す。非定常空気力の考慮が無い場合とルーフ上突起の有り無しの3ケースを比較し、FIG. 3.9, および拡大表示した FIG. 3.10 に示す。路面入力( $z_{rdf}, z_{rdr}$ ), 空気力( $A_f, A_r$ ), サスペンション発生力( $S_f, S_r$ ), ボデー相対変位( $z_{xf}, z_{xr}, z_x, \theta_x$ )を時系列で示している。路面段差により、フロントとリヤ車軸に車軸間距離の遅れを伴って路面入力が入り、それに対応して空気力, サスペンション力, 運動が発生し、振動しながら収まっていく様子が見られる。突起有りのケースは、非定常空気力の発生が小さく(主としてピッチ運動に対するリヤ空気力: $A_{r\theta}/\theta_x$ , FIG. 3.3 (b) が小さいため), 非定常空気力考慮の無い場合と運動の差がほぼ見られない。突起有りのケースにおいても、非定常空気力は発生しているもののサスペンション発生力に対し非常に小さい

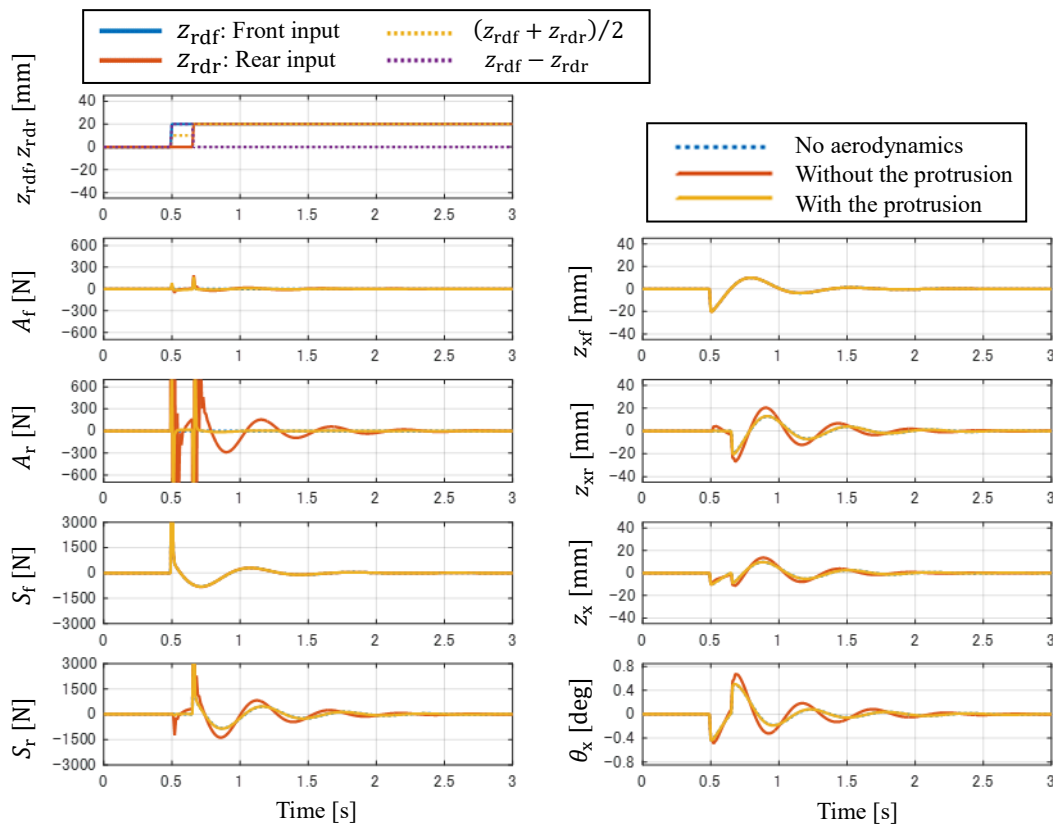


FIG. 3.9 Simulation results of the vehicle motions with the unsteady aerodynamic forces on a 20 mm step response at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect.



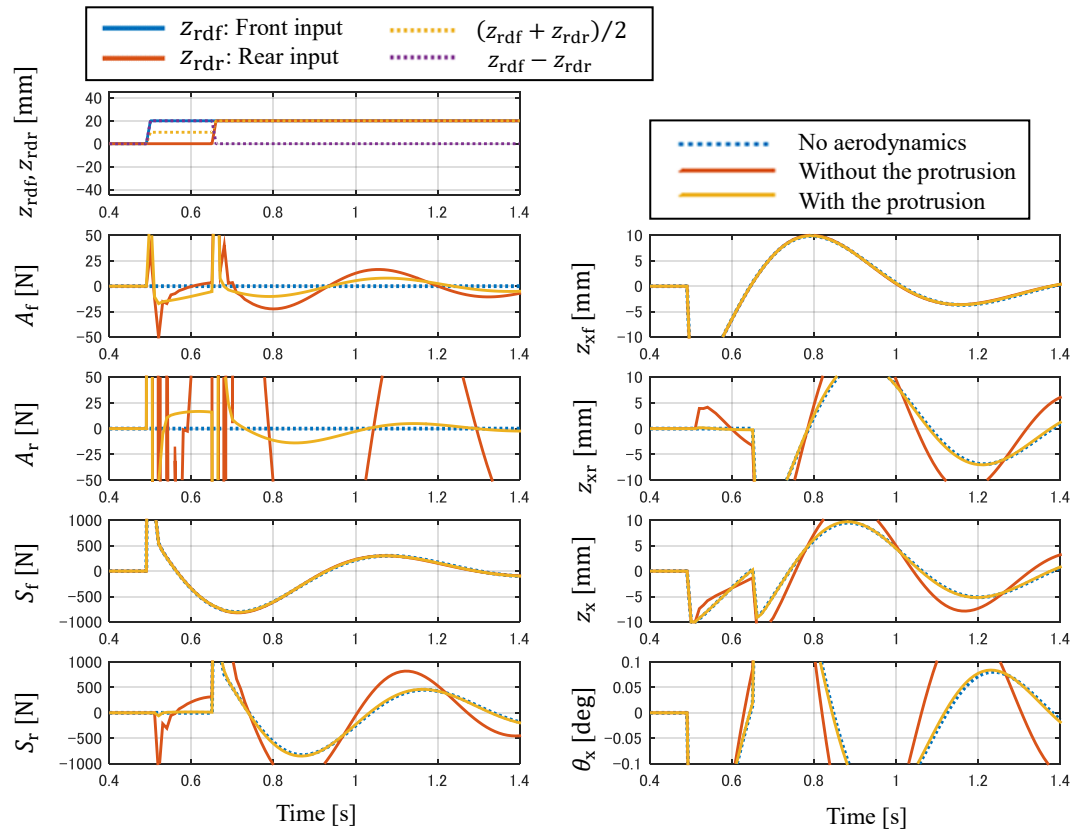


FIG. 3.10 Simulation results of the vehicle motions with the unsteady aerodynamic forces on a 20 mm step response at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect (Scoped from FIG. 3.9).

め (FIG. 3.10), 運動を変化させるまでの影響が出ていないことがわかる。一方, 突起無しの場合は, 他の2ケースとの違いが大きく見られ, リヤ空気力 ( $A_r$ ) が大きく発生し, ピッチ変位 ( $\theta_x$ ), 上下変位 ( $z_x$ ) の振幅が大きく, 応答は速くなっている。フロントとリヤ車軸での上下変位 ( $z_{xf}, z_{xr}$ ) で見ると, その違いはリヤの上下運動で発生していることがわかる。これらは, 運動応答関数が表す特性が, 時系列応答と示された結果である。また, 突起有り無しと比較において, サスペンション発生力にも差が見られており, 非定常空気力とサスペンション発生力が連成した運動となっていることが確認できる。

### 3.3.2. 一定周期路面での運動挙動比較

路面入力周波数の違いによる空気力影響を確認するため、2つの一定周波数サイン路面入力に対する運動応答を算出し、FIG. 3.11 に 1.4 Hz の場合、FIG. 3.12 に 1.8 Hz の場合について示した。前項と同じ3ケースについて比較した。ステップ応答の場合と同じく、非定常空気力考慮の無しと突起有りのケースには差がほとんどなく、突起無しのケースに差が見られる。FIG. 3.11 の 1.4 Hz 入力の場合は、その差は小さいが、突起無しの方がリヤ上下変位( $z_{xr}$ )の応答が速く、振幅(ゲイン)も大きくなっている。その結果、ピッチ角( $\theta_x$ )の応答は速くなるが、振幅(ゲイン)は小さくなっている。一方 FIG. 3.12 の 1.8 Hz の場合、突起無しのリヤ上下変位( $z_{xr}$ )は、1.4 Hz と同じく応答が速く振幅(ゲイン)が大きく、差がよりはっきり表れている。この時のピッチ角( $\theta_x$ )は、応答は速くなっているが、振幅(ゲイン)が 1.4 Hz と逆に大きくなっていることがわかる。入力周波数によってピッチ角変化への影響が逆転するこの現象は、サスペンションで決まるフロント/リヤ上下変位の大小関係が、入力周波数によって逆転しているためである。リヤ上下変位がフロントより小さい 1.4 Hz 入力の場合は、リヤ上下振幅が大きくなる

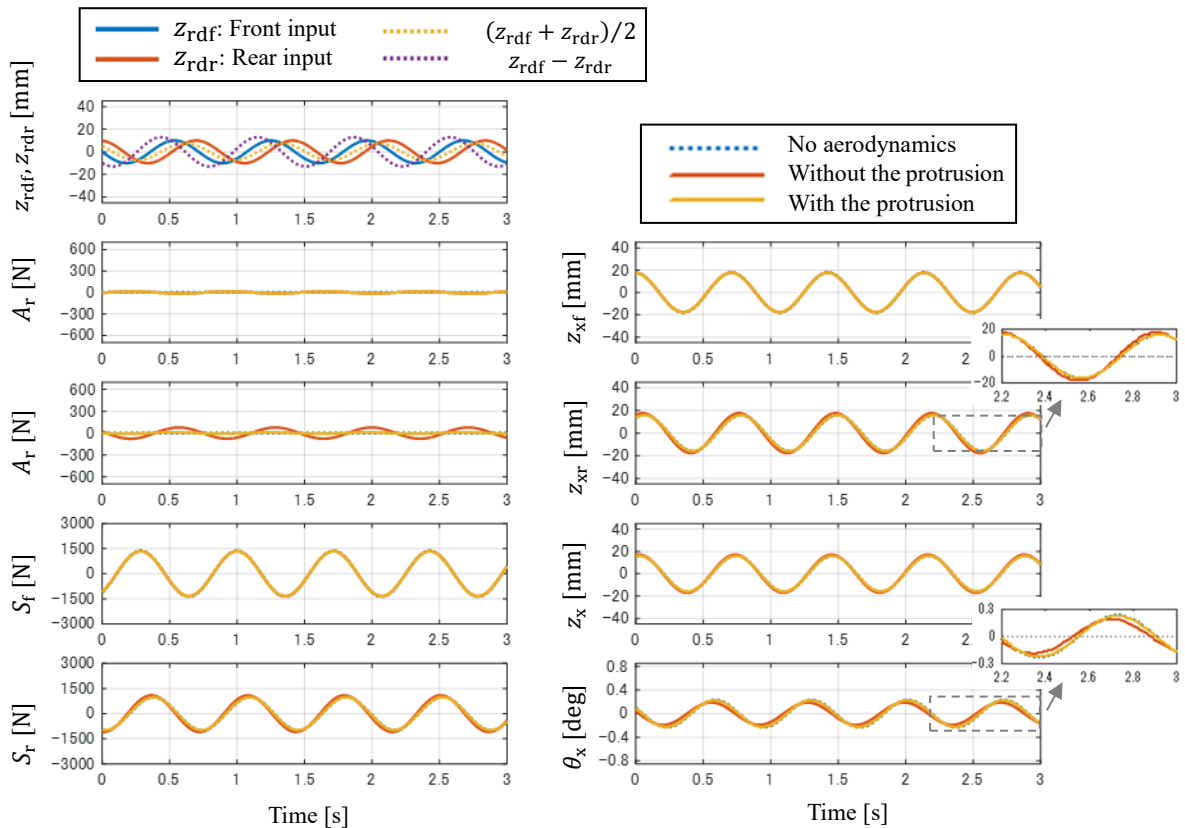


FIG. 3.11 Simulation results of the vehicle motions with the unsteady aerodynamic forces on a 10 mm sine road response of 1.4 Hz at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect.

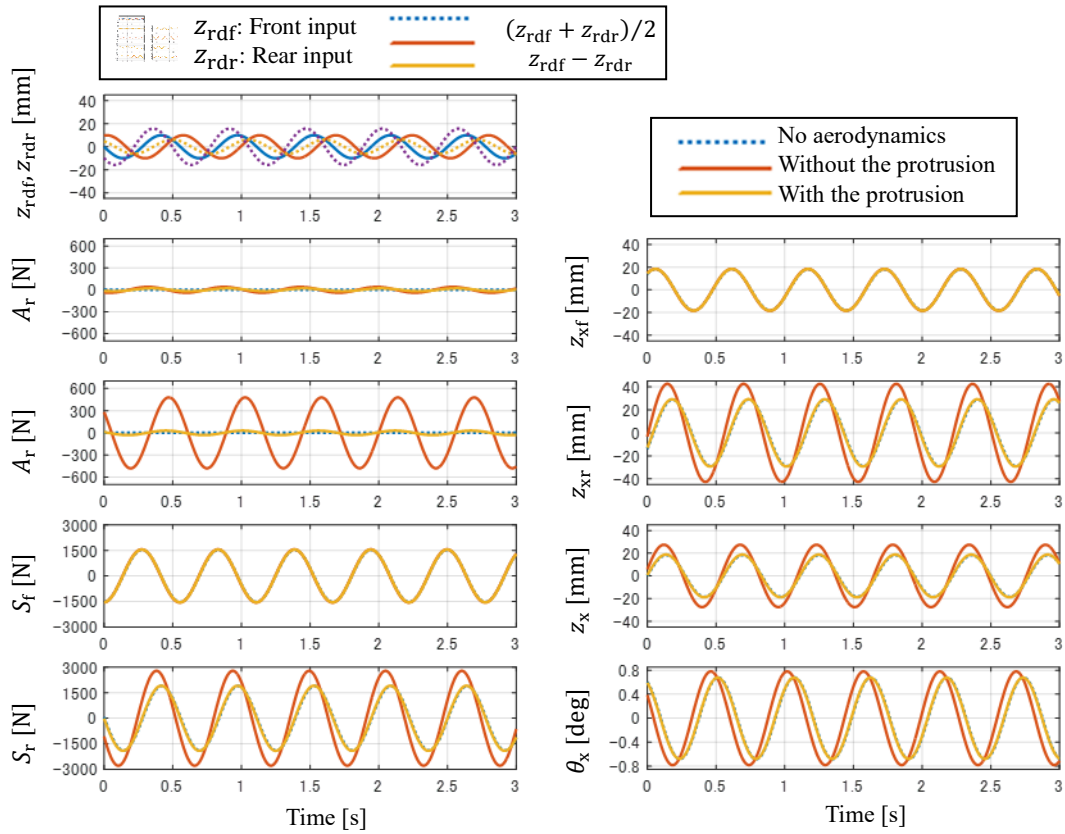


FIG. 3.12 Simulation results of the vehicle motions with the unsteady aerodynamic forces on a 10 mm sine road response of 1.8 Hz at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect.

ことでピッチ角が減少し、リヤ上下変位がフロントより大きい 1.8 Hz 入力の場合、リヤ上下振幅が大きくなることでピッチ角が増加する。このように、非定常空気力と車両サスペンション特性が周波数応答として連成しており、その考慮の必要性が確認された。

### 3.4. まとめ

運動により発生する非定常空気力を考慮した路面入力時の車両運動の解析を行い、以下の結果を得た。

- 運動により発生する非定常空気力の影響を、路面入力時の運動応答関数、および時系列シミュレーションで表す方法を示した。
- 細部形状(突起)の違いでも、運動による非定常空気力の発生により、車両運動に十分に大きな影響を与えることが確認できた。
- 非定常空気力の運動への影響を示すには、路面入力・サスペンション特性と合わせた周波数応答解析が必要であることが確認できた。

今回の車両形状では、

- ◆ 路面入力に対する運動応答関数での、細部形状(突起有り無し)による違いを確認できた。

【ピッチ運動】 突起無しの方が、低周波(1.6 Hz 以下)でゲイン小、高周波(1.6 Hz 以上)で大

【上下運動】 突起無しの方が、1.2 Hz 以上でゲイン大

【フロント上下運動】 差は無し

【リヤ上下運動】 突起無しの方が、共振周波数高く、ゲイン大、遅れ小

- ◆ 時系列シミュレーションでの、細部形状(突起有り無し)による違いを確認。

【ステップ路面】

突起無しの方が、リヤ空気力発生が大、リヤサスペンションの発生力も増加

リヤ上下振幅が増加し、それにより、ピッチ・上下運動振幅も増加

突起有りでは、その空気力の発生が小さくなるため、非定常空気力の考慮のない場合とほぼ同じ

車両挙動

【一定周波数路面】

突起無しの方が、リヤ空気力発生が大きく、リヤ上下振幅が増加、上下運動も増加だが、

ピッチ運動は、低周波入力では減少、高周波入力では増加

突起有では、非定常空気力の発生が小さくなるため、考慮のない場合とほぼ同じ車両挙動

- ◆ 突起形状による変化についての考察

突起無しの場合は、主にピッチ運動に対するリヤの非定常空気力( $A_{r\theta}/\theta_x$ )が大きく発生しており、リヤの上下運動を助長している。それに対し突起有りでは、流れが乱れることで、車両運動に対しての流れ応答が弱まり、非定常空気力の発生が減少すると考えられる。突起形状は、流れの乱れにより、定常空気力( $C_D, C_{Lr}, C_{Lr}$ )の増加を起こすが、逆に非定常空気力の発生は弱くなり、リヤの上下運動への影響は小さくなっている。

以上、自動車に働く空気力の運動への影響解析には、運動で発生する非定常空気力の考慮が必要であることを示し、今まで説明できていなかった非定常空気力の影響を、路面入力に対する運動応答として定量的に示すことができた。また、車両形状(流れの乱れ)の違いによる、非定常空気力発生の変化、運動への影響変化も示すことができた。

## 4. 解析方法の検証と考察

### 4.1. 実走行運動計測による検証

#### 4.1.1. 実走行での車両運動計測

ここまで行ってきた非定常空気力の車両運動へ与える影響解析の検証のため、実車両の走行試験にて路面入力に対する運動応答の計測を行った。Okada らが検討しているように (Okada et al., 2009), 空気力の影響が実走行での運動計測でも確認できると考えられる。今回の解析対象として選定している実際の車両を用い、ループ上の 40 mm×40mm の突起有り無しのケースについて、路面凹凸のあるテストコース走行で車両挙動を計測した。車載した車両ボデー前端と後端のレーザ変位計により、ボデーと地面の相対変位を計測した。その計測値から車両フロント/リヤ車軸でのボデーと地面の相対変位 ( $z_{xf}, z_{xr}$ ) へ変換し、さらに相対角度 ( $\theta_x$ ), 上下相対変位 ( $z_x$ ) を算出した (FIG. 4.1(a),(b))。走行路面のプロフィールは、計測されたデータがあり、FIG. 4.1(c)の路面となっている。車速 60 km/h にて走行した時の路面入力スペクトルは FIG. 4.1(d)となっており、0.6-2.0 Hz でおおむねフラットな入力となっている。

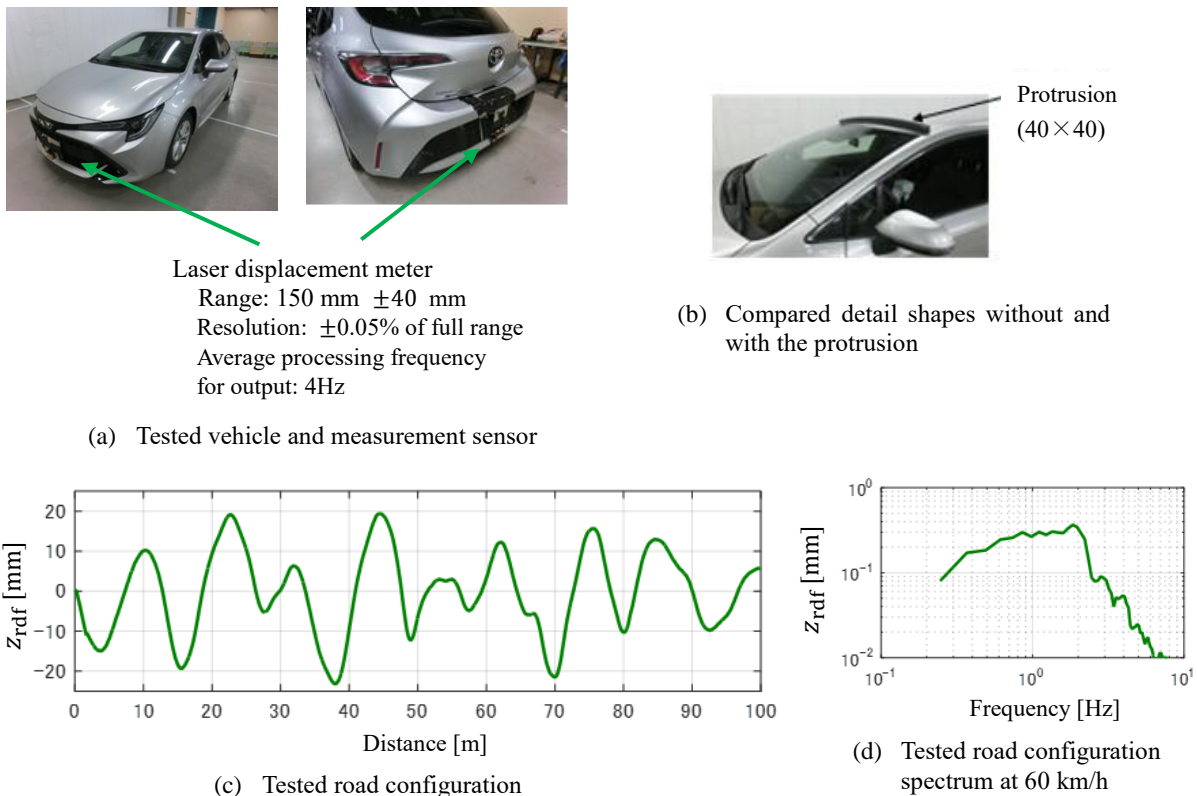


FIG. 4.1 Tested vehicle and measurement sensors, configuration, and spectrum of the road irregularity in the proving ground at the actual running test.

解析結果と実走行計測の比較を行う上で、相似則の観点からは、スケール差によるレイノズル数 ( $Re$ ) 違いによる流れ変化の影響が考えられる。解析で用いた非定常空気力は、1/4スケールでの風洞加振試験で計測しており、 $Re = (U \cdot L_M)/\nu = (20 \times 1.057)/\nu = 1.4 \times 10^6$  ( $\nu$ : 空気動粘性係数 =  $1.5 \times 10^{-5}$  [ $m^2/s$ ]) で行われたのに対し、実走行試験は、 $Re = (U \cdot L)/\nu = (16.7 \times 4.228)/\nu = 4.7 \times 10^6$  となる。このレイノズル数の領域でのこの差であれば、流れ形態の変化はほぼ無いと考えられる。また、走行試験で用いた車両と風洞試験模型の違いとしては、エンジン冷却口・サイドミラー・床下フロアの凹凸が挙げられるが、今回の比較ケースのルーフ突起有り無しについては、その変化傾向をなくすまでの影響はないとして、解析結果と実走行計測の比較を行った。

#### 4.1.2. 運動計測結果

実車両の走行試験での計測結果を、突起有り無しのケースを比較して、ピッチ角度 ( $\theta_x$ )、上下変位 ( $z_x$ ) を、路面変位入力 ( $z_{rdf}$ ) と並べて時系列 (FIG. 4.2, および拡大表示の FIG. 4.3) で示し、かつ、それぞれの振動スペクトル (FIG. 4.4) も示した。路面変位は同時計測できないので、シミュレーション結果の路面入力ピークと上下

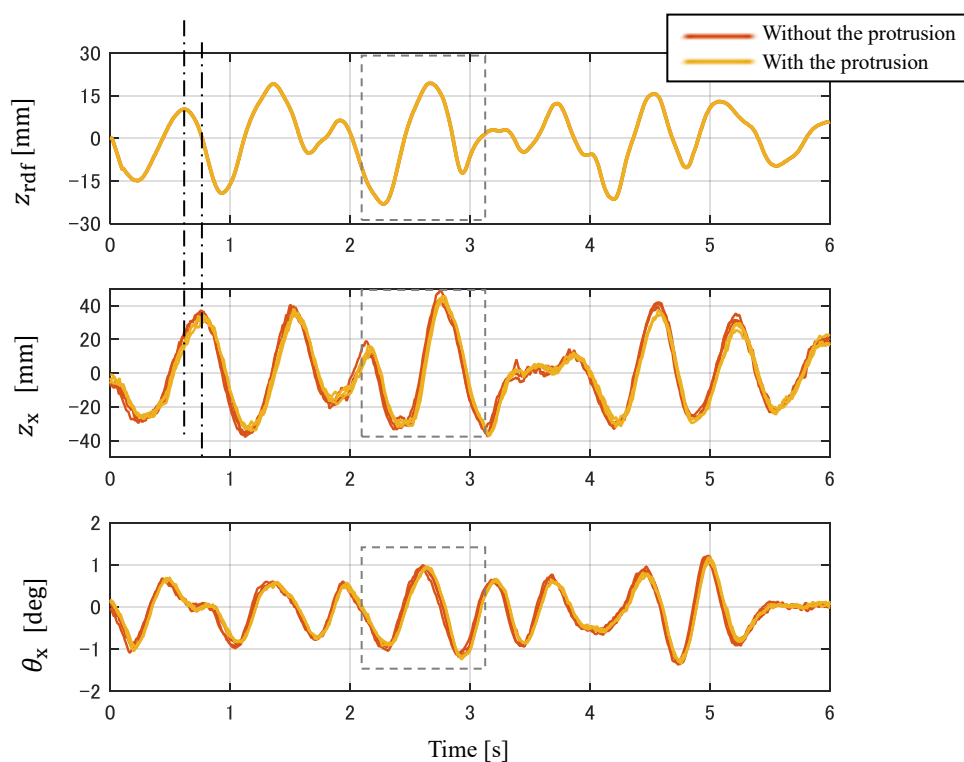


FIG. 4.2 Measured vehicle motions in timeline at the real vehicle running test in the proving ground at 60 km/h over three measurement trials on the real vehicle without and with the protrusion.

変位ピークの一発目の時間差を用いて、時間軸を合わせた (FIG. 4.2 の一点鎖線の時間差で合わせた)。突起有り無しそれぞれのそれぞれ3回の計測結果を同じ図中に示している。2つのケースそれぞれ3回の計測結果は、どの時系列波形を選んでもケース差が出ており、再現性のある計測ができていると考えられる。時系列波形ではその振幅の大きさの差がわかりにくい、FIG. 4.4 のスペクトル比較において、2つのケース差が確認でき、突起無しの方が上下変位 ( $z_x$ ) が大きく、ピッチ角 ( $\theta_x$ ) も大きくなっている。

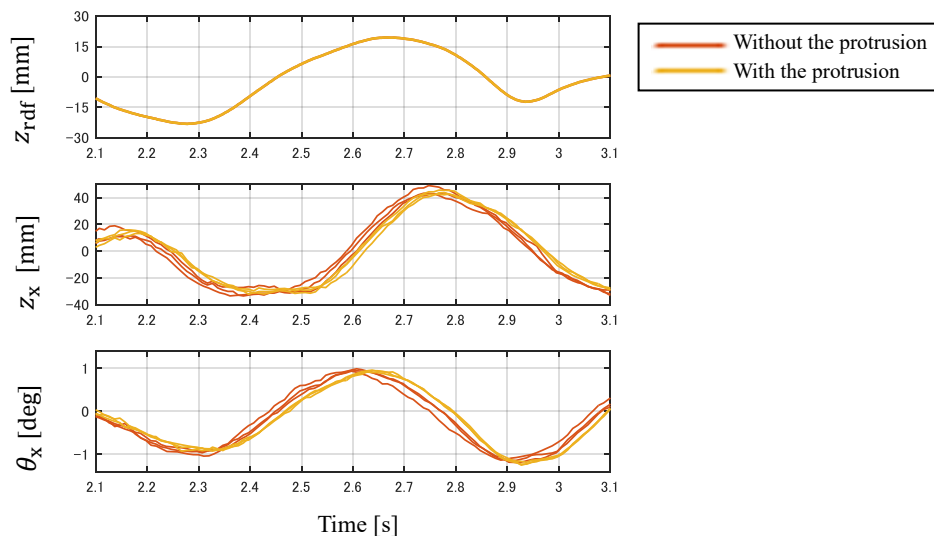


FIG. 4.3 Measured vehicle motions in timeline at the real vehicle running test in the proving ground at 60 km/h over three measurement trials on the real vehicle without and with the protrusion (Scoped from FIG. 4.2).

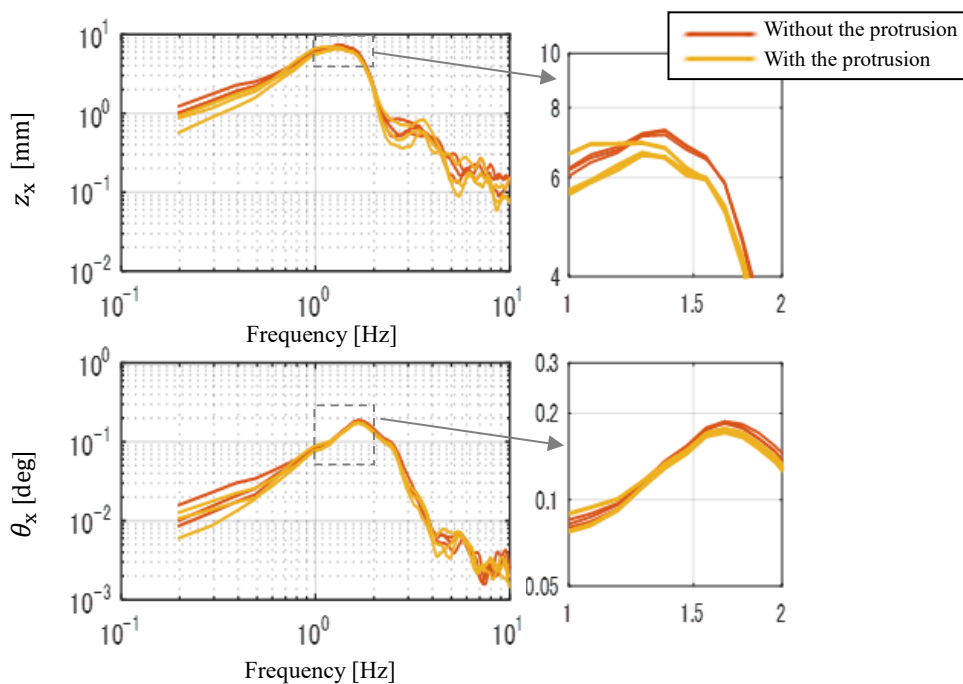


FIG. 4.4 Measured vehicle motions in spectrums at the real vehicle running test in the proving ground at 60 km/h over three measurement trials on the real vehicle without and with the protrusion.



### 4.1.3. 解析による予測結果との比較

実走行での計測条件に対応した時系列運動応答シミュレーションを行い、その結果を FIG. 4.5, および拡大表示した FIG. 4.6 に示す. 突起有り無しの場合に, 非定常空気力の考慮無しの場合も加え, 3ケースを示した. シミュレーション結果の時系列波形は, 実走行での計測結果と必ずしも同じ波形にはなっていないが, 突起無しの方が上下変位 ( $z_x$ ) のが大きく, ピッチ角 ( $\theta_x$ ) も大きくなっており, 実走行計測結果と同傾向であることが確認できる. 振動スペクトル (FIG. 4.7) においても, その差がはっきりと確認でき, 実走行計測結果と解析予測シミュレーション結果の傾向が一致している. 今回の路面入力周波数は 2 Hz までの高周波な入力が含まれているため, 運動応答関数に基づいて考えると, 突起無しの方が上下変位 ( $z_x$ ) ・ピッチ角度 ( $\theta_x$ ) がともに大きく表れることは妥当であり, 実走行での運動計測結果は, 解析で予測された結果と矛盾していない.

以上より, 細部形状 (突起) による車両運動の変化が今回の解析方法により予測できていることを, 実走行での運動計測結果により検証できた.

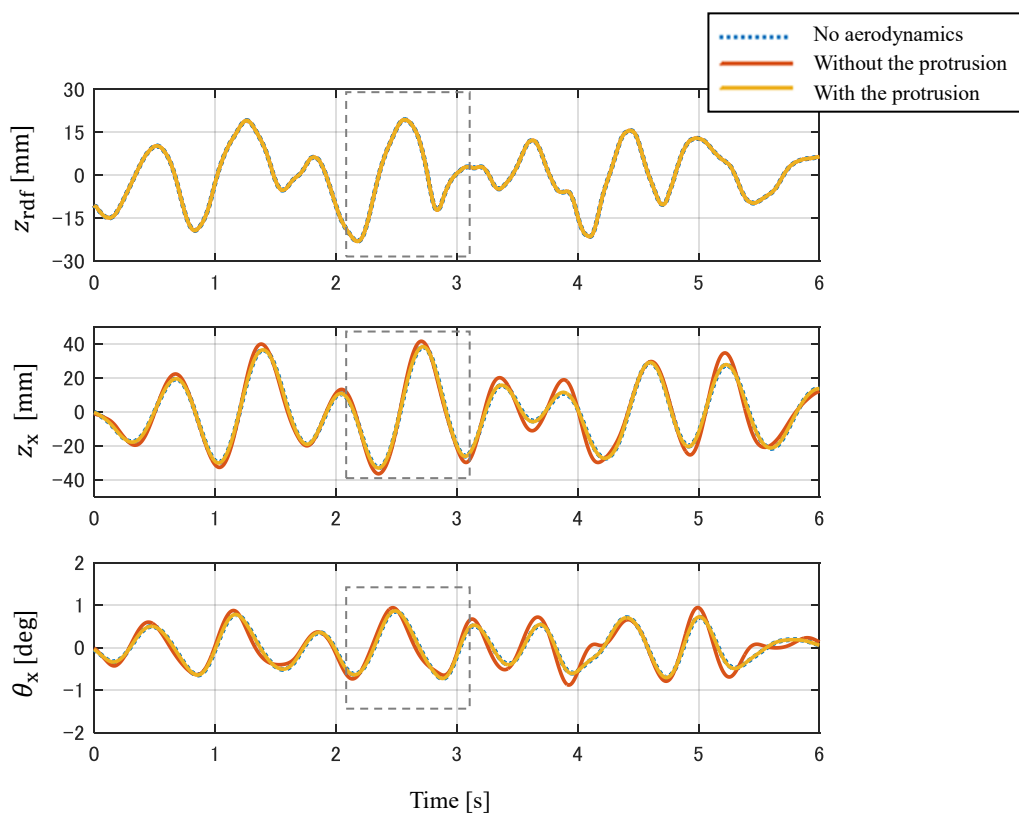


FIG. 4.5 Simulated vehicle motions in timeline by the simulation considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect.

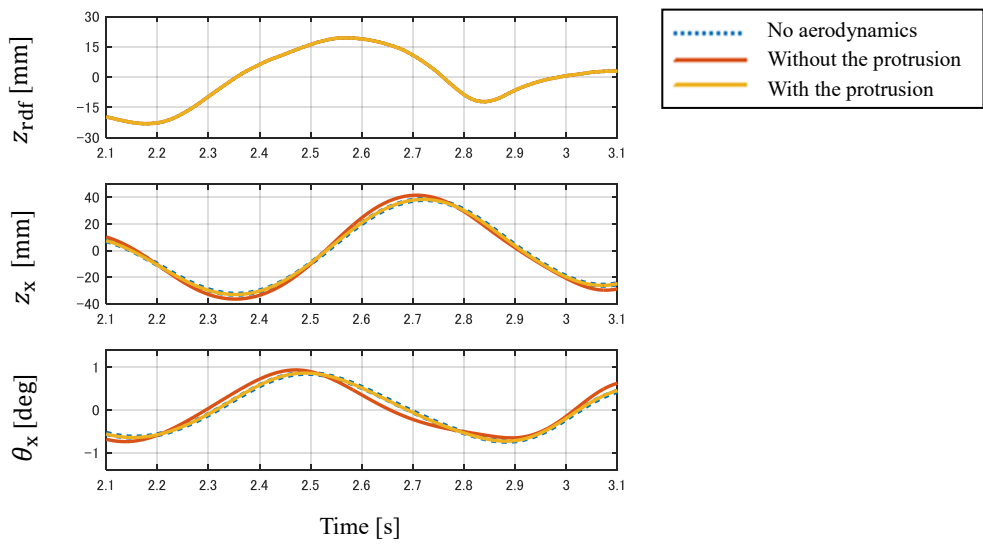


FIG. 4.6 Simulated vehicle motions in timeline by the simulation considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect (Scoped from FIG. 4.5).

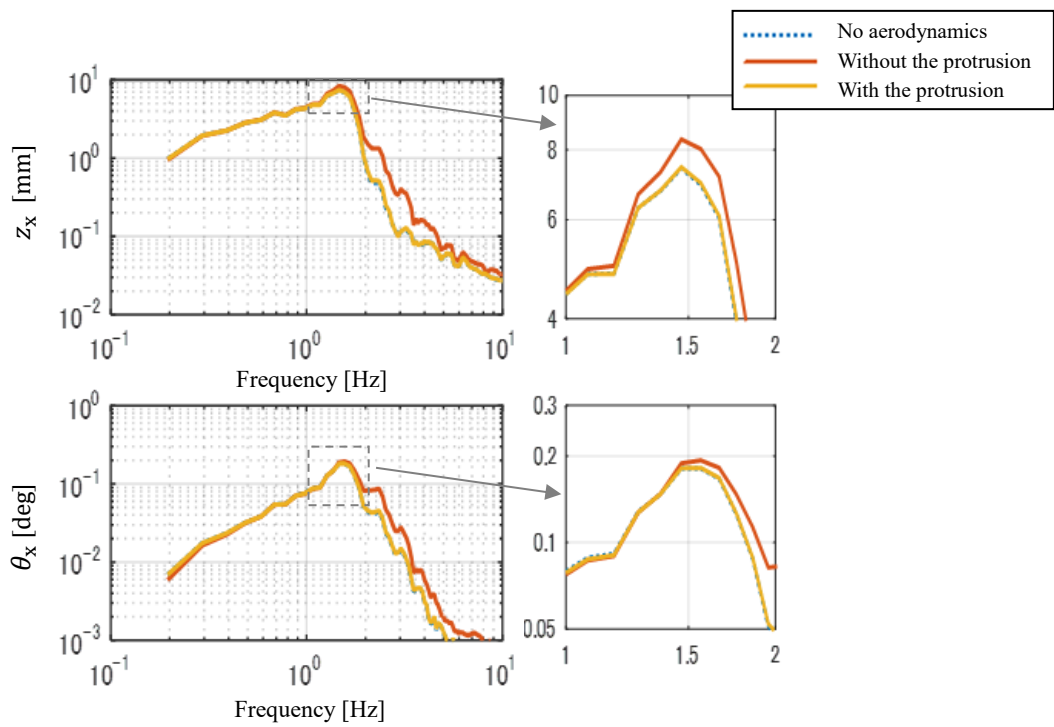


FIG. 4.7 Simulated vehicle motions in spectrums by the simulation considering the unsteady aerodynamic forces at 60 km/h on the real vehicle without the protrusion, with the protrusion, and no aerodynamic effect.

## 4.2. ドライバー評価との対応

### 4.2.1. ドライバー評価結果

実走行での車両運動計測時に、ドライバーによる感じ方の官能評価も行っており、その評価結果を FIG. 4.8 に示す。突起無しの場合を基準(評点3)として、突起有りでの変化を評点付けし、評価を行った。評点は5点評価で行っており、評点 +1 点はドライバーが誰でもわかるレベル、+0.5 点はドライバーの半数が変化のわかるレベルの差として評価している。2つのケースを比較すると、突起無しは、路面追従性の良さ(付随して、ステアリングのしっかり感、直進の安定感)を主に感じており、突起有りは、路面のショックやわらかさ(付随して、ブルブル感・ヒョコヒョコ感の少なさ、姿勢変化の少なさ)を主に感じている。形状差による発生空気力の違いが車両挙動の違いを起しており、それをドライバーは感じていると考えられる。

今回の突起は 40 mm×40 mm の角柱で、FIG. 2.6 の可視化結果で見られるように、流れの乱れが発生しており、それがドライバーの半数が感じられる運動の差を起していると考えられる。同様の流れの乱れは、車両のワーパ、ドアミラー、ホイール周りの流れや、床下流れで起こっており、同様に車両運動に影響を与えている。実際の車両開発において、形状による流れの乱れ変化に着目し、非定常空気力の発生を考慮していくことは重要であると言える。

#### Subjective evaluation points

3 of evaluation point: baseline points

5 is best and 0 is worst

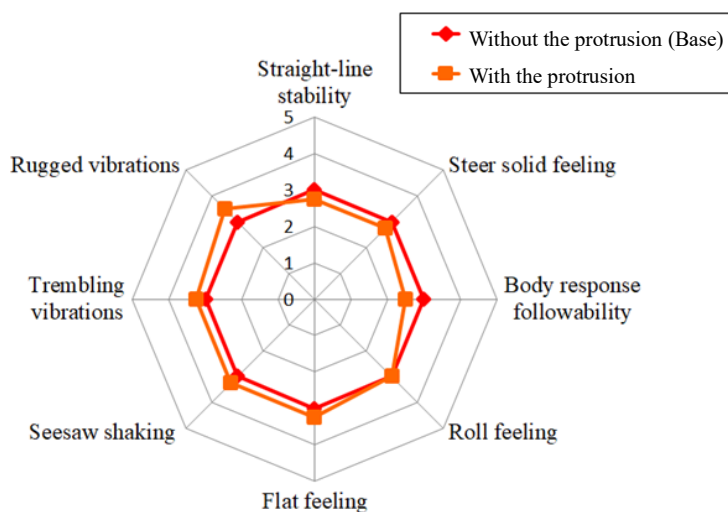
+1 point: better as anyone can feel

+0.5 point: better as half people can feel



Protrusion  
(40 × 40)

(a) Compared detail shapes without and with a protrusion



(b) Subjective evaluation results for each case at straight running tests in the proving ground

FIG. 4.8 Subjective evaluation results at the irregularity road in the proving ground at the actual running test.

## 4.2.2. 車両運動とドライバー評価の対応

ドライバーによる感じ方の評価を、実走行での運動計測結果、および解析による運動予測結果と対比させて考察すると、突起無しでの路面追従性の良さを感じるのは、上下・ピッチ運動が入力に対し応答遅れが少なく、応答ゲインも大きいことに表れ、突起有りで路面ショックのやわらかさを感じるのは、上下・ピッチ運動の応答が遅いことと、ゲインが小さいことに表れていると考えられる。

今回の車両での突起有り無しの比較では、以下の対応が確認できた。

**【突起無し】** 路面入力への追従性が良い（手ごたえ・直進性良さにもつながる）

路面ショック大

= “しっかりした感じ“

= 路面入力に対する上下・ピッチ運動の応答ゲイン大・遅れ小

**【突起有り】** 路面のショックのやわらかさが良い（振動の少なさ・姿勢変化の少なさにもつながる）

路面追従性が劣る

= “安定しないあいまいな感じ”

= 路面入力に対する上下・ピッチ運動の応答ゲイン小・遅れ大

以上より、今回対象としている運動と空気力の変化だけで車両性能全体の良し悪しの判断をすることはできないが、非定常空気力が車両運動に与える影響の解析により、細部形状の違いでドライバーが感じる運動挙動の差を、一部ではあるが定量的に示すことができた。また、車両開発においてこの観点を取り入れ、車両サスペンション特性と合わせて考えることで、車両の応答性(しっかりした感じ)と乗心地(やわらかさ)をより高いレベルで両立させる手段となり、さらなる車両性能向上が可能になると考えられる。

### 4.3. 車両諸元に対する影響度解析

#### 4.3.1. 空気力係数と車両諸元による特性値の比較方法

今回定式化した、非定常空気力を考慮した路面入力に対する運動応答を表す方程式において、非定常空気力の各係数(空気イナータ、ダンピング、ばね)を、等価な車両諸元(車両質量、サスペンションのダンピング係数、ばね係数)と対比することで、非定常空気力の影響度を評価することができないかと考えた。路面入力に対するピッチ・上下運動の伝達関数は式(28)で表されており、その中の  $\hat{M}(s)^{-1}$  について、各係数を整理して具体的に示したものが、式(29)となる。行列の各成分を、1項目が車両諸元、2項目が空気力と分け、ラプラス演算子  $s$  の次数ごとに加速度、速度、変位に比例する項として整理し、それぞれの係数を比較する。空気力係数にある一次遅れについては通分して整理し、それにより残る  $E_{rz}(s)$  の項は、車両の共振周波数近辺(1Hz~2Hz)ではその発生力は小さくなることから、比較からは除いた。

ここで、ピッチ運動で発生するリヤの空気力係数については、サスペンション変位による力の発生方向に合わせるため、符号を反転させた空気力係数に入れ替えて( $m_{r\theta}^* = -m_{r\theta}$ ,  $c_{r\theta}^* = -c_{r\theta}$ ,  $k_{r\theta}^* = -k_{r\theta}$ ) 表記した。空気力は、正のピッチ角(前上がり)に対しフロント/リヤ共に上向きの力を正として定義しているが、車両の慣性力・サスペンション(ダンピング・ばね)力は、上方向変位に対しフロント/リヤ共に上向きの力を正として定義してお

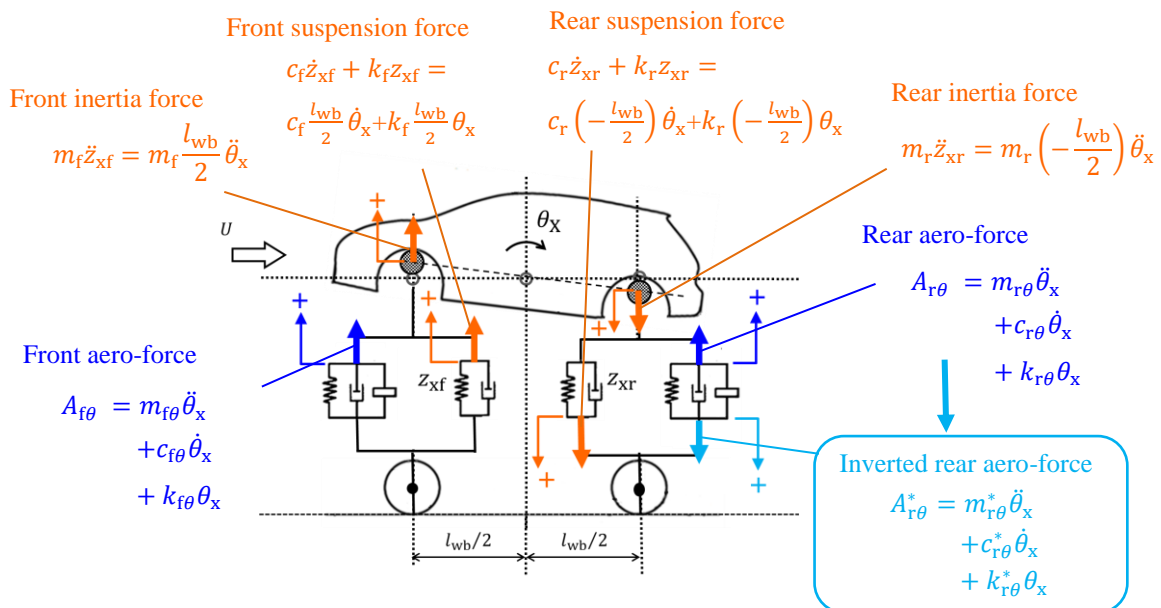


FIG. 4.9 Inverting definition of rear aerodynamic force due to pitch motion corresponding to the vehicle suspension and inertia force definition in pitch motion.

り、ピッチ運動に対しては、リヤの力の定義方向に食い違いを生じていた。慣性力・サスペンション力の定義は、正のピッチ角に対し、リヤ上下変位が負となり力の発生も下向きが正となるため、リヤ空気力の定義をその方向に合わせた。上下運動では同方向の定義であり、反転の必要はない(FIG. 4.9)。

$$\begin{aligned}
\widehat{M}(s)^{-1} &:= \frac{1}{\widehat{M}_{11}(s) \cdot \widehat{M}_{22}(s) - \widehat{M}_{12}(s) \cdot \widehat{M}_{21}(s)} \cdot \begin{bmatrix} \widehat{M}_{22}(s) & -\widehat{M}_{12}(s) \\ -\widehat{M}_{21}(s) & \widehat{M}_{11}(s) \end{bmatrix} \\
&= \frac{1}{\widehat{M}_{11}(s) \cdot \widehat{M}_{22}(s) - \widehat{M}_{12}(s) \cdot \widehat{M}_{21}(s)} \cdot \\
&\left\{ \begin{bmatrix} (m_f + m_r)s^2 + 2(c_f + c_r)s + 2(k_f + k_r) & -(m_f - m_r)s^2 - 2(c_f - c_r)s - 2(k_f - k_r) \\ -\frac{l_{wb}}{2}(m_f - m_r)s^2 - l_{wb}(c_f - c_r)s - l_{wb}(k_f - k_r) & \frac{l_{wb}}{2}(m_f + m_r)s^2 + l_{wb}(c_f + c_r)s + l_{wb}(k_f + k_r) \end{bmatrix} \right. \\
&\left. - \begin{bmatrix} m_{fz}s^2 + \left(c_{fz} + \frac{m_{rz}}{\tau_{rz}}\right)s + \left(k_{fz} + \frac{c_{rz}}{\tau_{rz}} - \frac{m_{rz}}{\tau_{rz}^2}\right) + E_{rz}(s) & -m_{fz}s^2 - \left(c_{fz} - \frac{m_{rz}}{\tau_{rz}}\right)s - \left(k_{fz} - \frac{c_{rz}}{\tau_{rz}} + \frac{m_{rz}}{\tau_{rz}^2}\right) + E_{rz}(s) \\ -(m_{f\theta} - m_{r\theta}^*)s^2 - (c_{f\theta} - c_{r\theta}^*)s - (k_{f\theta} - k_{r\theta}^*) & (m_{f\theta} + m_{r\theta}^*)s^2 + (c_{f\theta} + c_{r\theta}^*)s + (k_{f\theta} + k_{r\theta}^*) \end{bmatrix} \right\} \\
&E_{rz}(s) = \frac{m_{rz}/\tau_{rz}^2 - (c_{rz}/\tau_{rz}) + k_{rz}}{\tau_{rz}s + 1} \\
&m_{r\theta}^* = -m_{r\theta}, \quad c_{r\theta}^* = -c_{r\theta}, \quad k_{r\theta}^* = -k_{r\theta} \tag{29}
\end{aligned}$$

行列の各成分の 1 項目の車両諸元と 2 項目が空気力を対比して見ると、上下・ピッチに対するフロントとリヤの空気力係数ごとに、対応する車両諸元の特性値が特定できる。その対応する空力係数と車両諸元特性値の比較を行い、影響度を確認した。

ここで、考慮から外した  $E_{rz}(s)$  について確認してみると、上下運動に対するリヤ空気ばね ( $k_{rz}$ ) は、他の項には入っておらず、車両諸元特性に対する影響度が無い位置づけとなっている。上下運動では一次遅れ係数 ( $\tau_{rz}$ ) が働くことで、リヤ空気ばね係数 ( $k_{rz}$ ) の影響は無くなることを表しており、流れ現象から、上下運動時のリヤ部は、上下変位だけ(上下速度、加速度を考えない)では流れ変化が起きにくいこと、フロント部流れの影響を受けて応答するが遅れがあることが考えられ、考慮の必要性が小さいことが理解できる。一次遅れの考慮の必要性自体が、上下運動時のリヤ空気ばね係数の影響が小さいことを示しており、遅れが大きいほど影響はより小さくなっていく。

### 4.3.2. 空気力係数の影響割合の算出

この式(29)での各項の比較により、対応する車両諸元特性値に対しての空気力係数の大きさ割合(%)を計算し、FIG. 4.10 に示した。比較条件は、車速が 60 k m/h の場合とし、比較した車両諸元特性値と空気力係数は、図中の横軸ラベル名に、各項ごとに分母と分子で示した。上下運動に対する空気力影響(FIG. 4.10 (a))と、ピッチ運動に対する空気力影響(FIG. 4.10 (b))に分け、それぞれ、加速度・速度・変位の比例項のフロント/リヤごとに比較し、車両フロント/リヤの質量・ダンピング・ばねとの対比を行った。

上下運動での空気力影響については、フロントの空気ダンピング( $-c_{fz}$ )の影響が大きく、車両のダンピングを増加させる効果となっている。一方リヤでは、空気イナータと一次遅れ( $-m_{rz}/\tau_{rz}$ )により、負のダンピング効果が作用していることがわかる。上下運動に対しては、突起の有り無しでの差は大きくは見られない。

ピッチ運動での空気力影響については、フロントの空気ばね( $-k_{f\theta}$ )の影響が大きく、負のばね効果となっていることがわかる。突起有り無しでの差は見られない。一方リヤにおいては、リヤ空気イナータ( $-m_{r\theta}^*$ )の影響が非常に大きく、突起無しの場合では、車両のピッチ運動に対するリヤ慣性力( $l_{wb}/2 \cdot m_r$ )影響を 39%減らすことと同等の効果があることがわかる。また、リヤ空気ダンピング( $-c_{r\theta}^*$ )の影響も見られ、正のダンピングとして作用し、

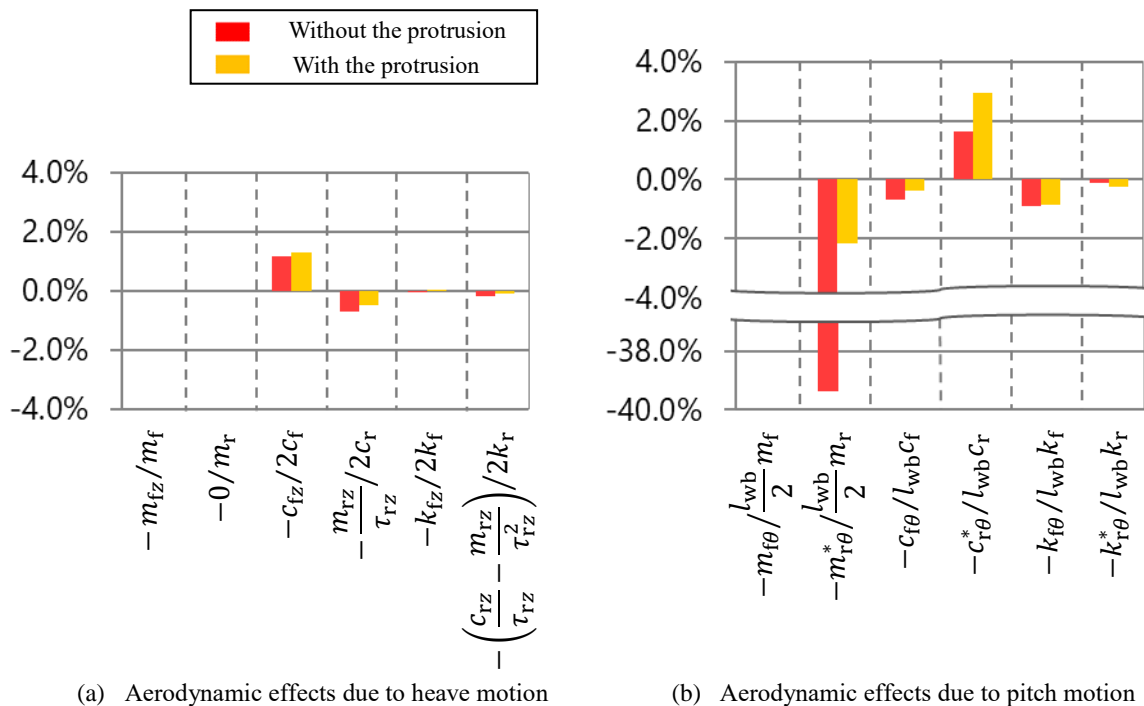


FIG. 4.10 Rates of the unsteady aerodynamic coefficients to the equivalent vehicle specification factors (from vehicle mass, damping, and spring of suspension) at 60 km/h on the real vehicle without and with the protrusion.

運動を促進する力と抑制する力がともに発生しており、入力周波数によって運動への影響が変化していくことが推測される。以上、空気力係数の影響割合の比較から、ピッチ運動でのリヤ空気イナータ( $-m_{r\theta}^*$ )の影響度が最も大きく、入力周波数が高くピッチ運動が大きく発生する場合に、突起有り無しの影響割合の差が大きくなると考えられる。

以上、運動で発生する非定常空気力係数について、等価な車両諸元値と比較することにより、無視できない影響割合を持っていることが確認でき、また、影響割合の大きい着目すべき空気力を示すことができた。

今回の車両形状での検討では、

- ◆ 車両諸元に対し影響割合の大きい非定常空気力係数は、

【上下運動時】 フロントダンピング( $-c_{fz}$ )、リヤイナータと一次遅れ( $-m_{rz}/\tau_{rz}$ )

【ピッチ運動時】 フロントばね( $-k_{f\theta}$ )、リヤイナータ・リヤダンピング( $-m_{r\theta}^*, -c_{r\theta}^*$ )

- ◆ 細部形状(突起有り無し)による、非定常空気力係数の影響割合は、

【上下運動時】 フロント/リヤともに、差はわずか。

【ピッチ運動時】 フロント、差はほとんど無し

リヤイナータ( $-m_{r\theta}^*$ )の差が非常に大きい

ことを示すことができた。



## 4.4. 流れと空気力の対応

### 4.4.1. 模型加振時の流速応答の計測

運動によって発生する非定常空気力の影響は小さくないことから、その空気力を発生させている流れを捉える目的で、車両表面の境界層の厚さと境界層内の流速応答に着目し、計測を行った。車両模型幅方向中心のルーフ後端において、風洞での模型加振中の流速応答を、熱線流速計を用い時系列で計測した(100 Hz, 100 s でサンプリング)。風速 20 m/s, ピッチ加振周波数 0~2.0 Hz, 突起有り無しの場合について、高さ方向 -10~140 mm の境界層流速分布を計測し、平均値と標準偏差として示した(FIG. 4.11)。

### 4.4.2. 流速応答の計測結果

FIG. 4.11 の平均値と標準偏差を見ると、突起有り無しともに(突起無し, 高さ 0 mm の 0 Hz の標準偏差以外), どのケースも周波数による違いはほとんど見られない。つまり、定常状態の境界層の状態が空気力応答の差が決まっていると考えられる。境界層厚さ(99%厚さ)で比較すると、突起無しは 20 mm, 突起有りは 120 mm という大きな違いがあり、変動分(標準偏差)にも高さ 10 mm 以上の領域で大きな違いが見られる。変動分には、流れ

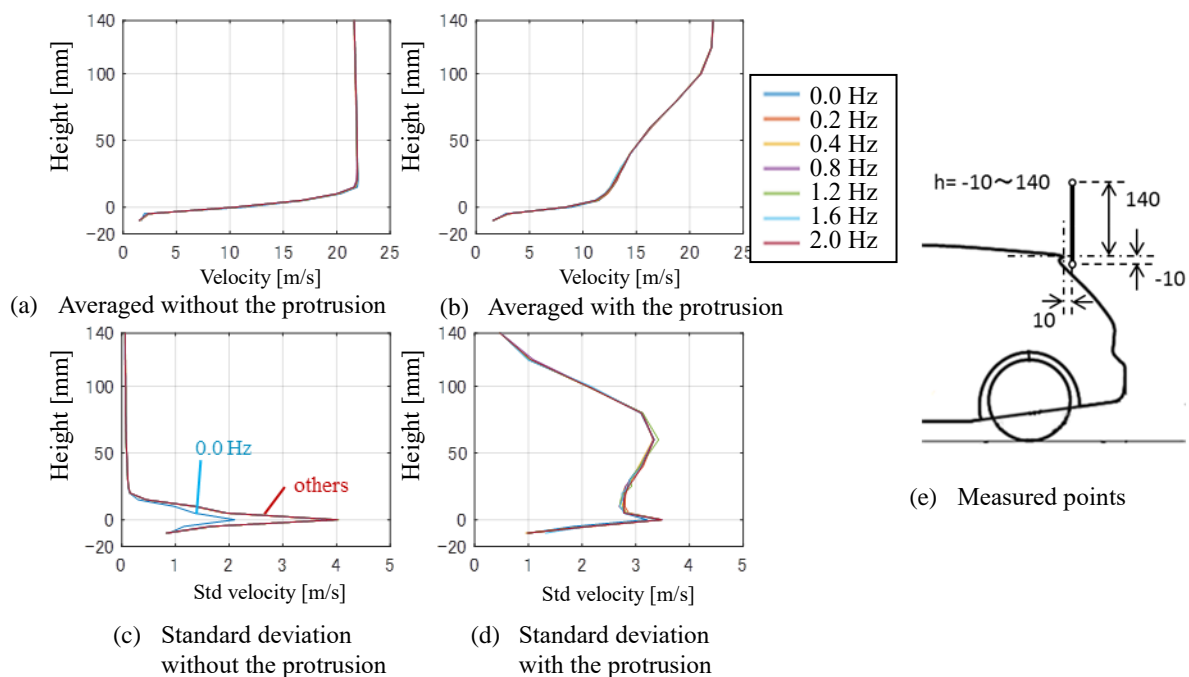


FIG. 4.11 Boundary layer average velocity and standard deviation in pitch excitation of 0.0–2.0 Hz at 20 m/s, on 1/4 model without and with the protrusion.

の乱れによるものと、加振による流速応答による変動分が重なっていると考えられる。突起無しでは、乱れによる変動分は見られず、高さ 0 mm 近辺での加振による流速応答が、突起有りよりも大きいことがわかる。突起有りは、乱れによる変動分が大きく、高さ 10 mm 以上では、加振による流速応答が乱れに隠れてしまっていると考えられる。さらに、高さ 0 mm での流速応答も、乱れのために小さくなっていると考えられる。

そこで、どの範囲の高さまでの流れが運動に反応しているかを確認するため、時系列データを周波数解析し流速スペクトルで確認した。ここでは、ピッチ加振 1.6 Hz、突起有り無しのケースで、高さ -10~40 mm の流速スペクトルを重ねて示した (FIG. 4.12)。 (a),(b)に広範囲の周波数 (0.1 - 50 Hz) の結果を示し、 (c),(d)に加振周波数の前後 (0.5 - 4.0 Hz) を拡大して示している。突起無しでは -10~15 mm の範囲で流速応答が見られるが、突起有りでは -10~5 mm の範囲までになっていることがわかる。つまり、突起無しでは高さ 15 mm までの領域の流れが加減速されるのに対し、突起有りでは 5 mm までの範囲に狭まっており、その違いが応答する流量・流速変化となり、空気イナータ係数・ダンピング係数の違いを発生させる要因となっていると考えられる。この流速応答領域の範囲は、加振周波数では変わっていない (FIG. 4.12 (c),(d)の標準偏差より) ことから、定常状態の境界層の状態 (境界層の厚さ、乱れの大きさ) によって決まると推測される。また突起有り無しで、流速スペクトルのゲイン (流速応答の大きさ) にも違いが見られており、それも空気係数の違いにつながっていると考えられる。

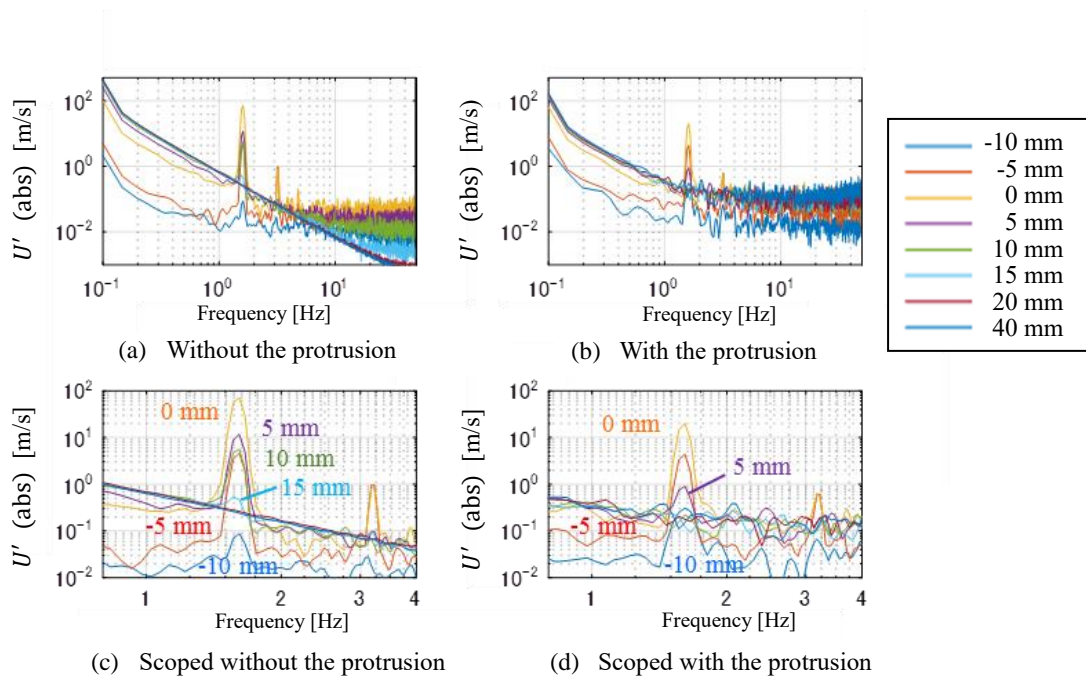


FIG. 4.12 Spectrums of boundary layer velocity response in pitch excitation of 1.6 Hz at 20 m/s on 1/4 model without and with the protrusion.

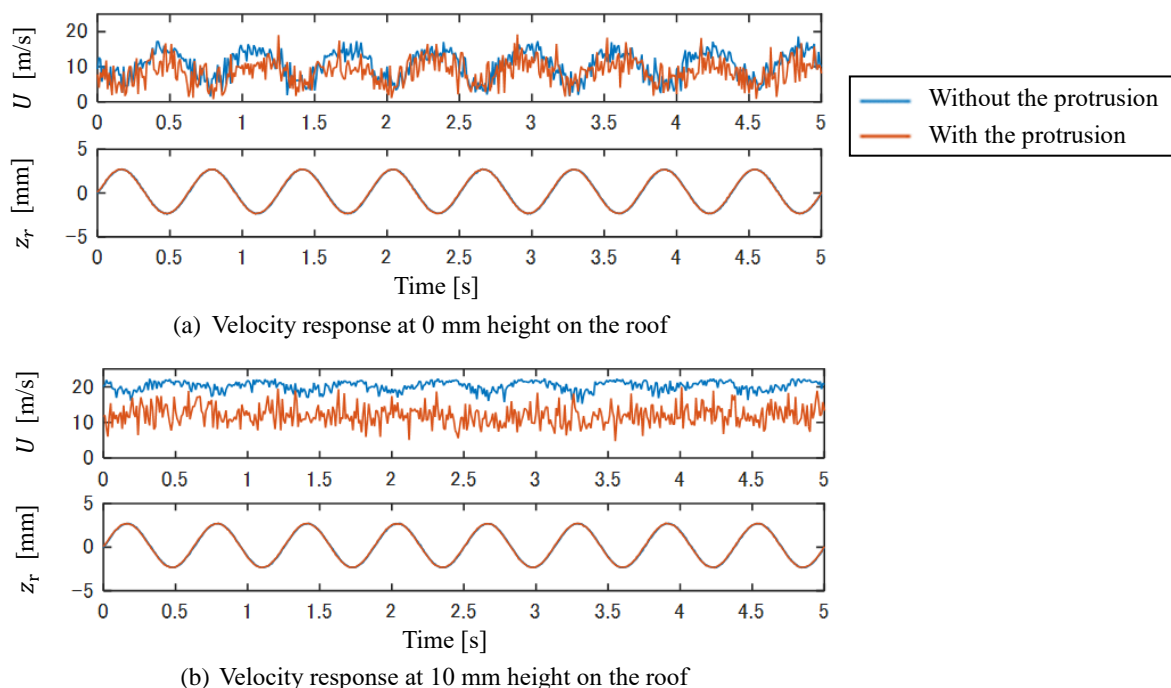


FIG. 4.13 Time-lines of boundary layer velocity in pitch excitation of 1.6 Hz at 20 m/s, at 0 mm and 10 mm, on 1/4 model without and with the protrusion.

この流速応答領域が、流れの状態で違っていることを再確認するため、ルーフからの高さ 0 mm と 10 mm での時系列データで、突起有り無しの場合を比較して示した (FIG. 4.13)。高さ 0 mm では、突起有り無しともに、リヤ車高に合わせて流速が応答しているが、高さ 10 mm では、突起無しのみが応答しているのが確認できる。突起有りでは流れの乱れが大きいため、応答ができなくなっていると考えられる。

以上から、車両表面の流速の大きさ、および運動に対する流速応答の範囲が広いほど、非定常空気力(空気イナータ・ダンピング・ばね)の発生が大きくなると考えられる。よって、非定常空気力の発生には、車両表面近くの流れが重要であり、境界層の厚さや乱れの影響が大きいと考えられる。

#### 4.4.3. 空気力係数と流れ応答の関係

運動時の流速応答の計測結果より、車両表面の流速の大きさと流速応答範囲が、空気力の発生に大きく関係していることが観察された。その観点に基づいて、前節 4.3 で明らかにした運動への影響割合が大きい非定常空気力係数に対し、その空気力を発生させる流れについて考察を行った (FIG. 4.14)。

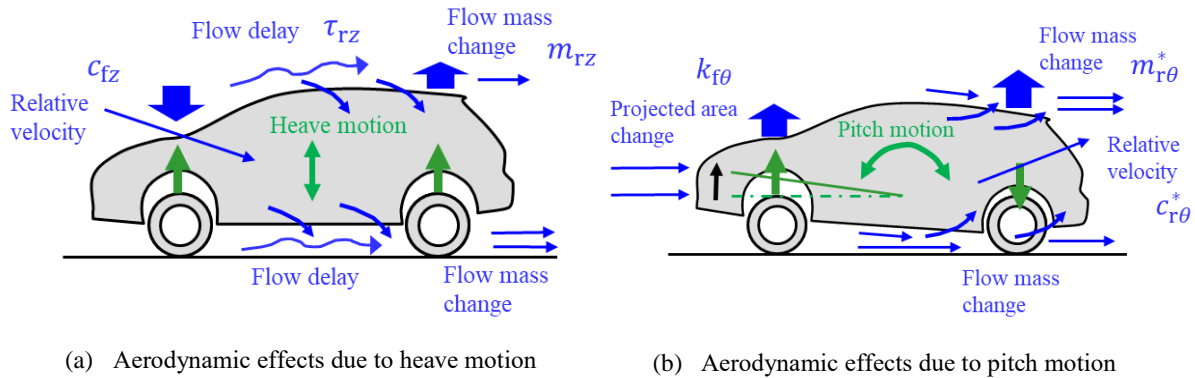


FIG. 4.14 Flow around the vehicle body that should be paid attention to, with considering from the effective unsteady aerodynamic coefficients

上下運動時のフロント空気力係数は、空気ダンピング ( $c_{fz}$ ) の影響が大きいことから、車両の上下運動速度が走行風と合成され相対風の加減速が影響していると考えられる。上下運動時のリア空気力係数では、空気イナータと空気一次遅れ ( $m_{rz}/\tau_{rz}$ ) による負ダンピング効果が大きい。これは、ルーフ部・床下部の流れが側面部との間で行き来するため上下運動に対し流量変化を起こすが、その流れの行き来はフロントからリアへ流れる間に起こるため遅れが発生する。その遅れがあるため、流量変化がダンピングとして働くことになっていると考えられる。流れが側面へ逃げ上下面の流量が減ることで、ボデーは上下に動きやすくなり、負のダンピングとして働くと考えられる。突起有りの場合は、流れの乱れによりその流れ挙動が少なくなるため、リアの非定常空気力の発生が弱まると考えられる。

ピッチ運動時のフロント空気力係数は、フロントばね ( $k_{f\theta}$ ) の影響が大きいことから、車両のピッチ姿勢によって流れを受ける受風面積が変化することで、空気力が変化していると考えられる。ピッチ運動のリア空気力係数では、リアイナータ ( $m_{r\theta}^*$ ) が大きく働いているが、上下運動での説明と同じく、ルーフ部・床下部の流れが側面部と行き来することにより流量変化を起こし、空気イナータが働くと考えられる。ピッチ運動の場合は、流れに対する姿勢角度変化がおこるため、流れの行き来が遅れ無く起こり、リアでの流量変化が遅れ無く発生すると考えられる。また、ピッチ運動のリアにはリアダンピング ( $c_{r\theta}^*$ ) も働くが、ピッチ運動によるリア上下速度により相対風の加減速が発生するためと考えられる。突起有りの場合は、上下運動と同じく、乱れのためにそれらの流れ挙動が少なくなり、リアの発生力が弱まると考えられ、非定常空気力係数の変化に合致している。

以上のように、車両表面の流れが重要であるとの観点から、非定常空気力係数と流れの対応を結び付け、着目すべき流れを考察することができた。

今回の車両形状の検討では、

- 非定常空気力係数に対応する着目すべき流れは、

【上下運動時】 フロントダンピング( $c_{fz}$ ): 上下速度と走行風の合成風速

リヤイナータと一次遅れ( $m_{rz}/\tau_{rz}$ ):

ルーフ・床下と側面との間の流量変化と、フロントからの流れの履歴

【ピッチ運動時】 フロントばね( $k_{f\theta}$ ): ピッチ姿勢による流れの相対角度変化

リヤイナータ( $m_{r\theta}^*$ ): ルーフ・床下と側面との間の流量変化

(ピッチのため遅れ無し, 効果大)

リヤダンピング( $c_{r\theta}^*$ ): ピッチ運動による上下速度の合成風速

- 細部形状(突起)による車両表面流れの影響は、

【突起 無し】 流速が速く, 加減速, 流量変化も大きく, 非定常発生空気力も大きい

【突起 有り】 乱れ発生による流速低下により, 非定常発生空気力が減少

(フロントは影響なく, リヤの空気力発生が弱められる)

と考察することができた。

## 4.5. まとめ

車両運動へ与える非定常空気力の影響解析の検証のため, 実走行での運動計測, ドライバー評価を行った。また, 非定常空気力の車両諸元特性値に対する影響割合の算出, 車両回り流れ応答の計測により考察を行った。それらにより, 以下を明らかにした。

- 細部形状(突起)による非定常空気力の車両運動への影響が, 今回の解析方法により予測できていることを, 実走行での運動計測で検証できた。
- 今回の解析方法により, ドライバーの感じる運動挙動の差を, 一部ではあるが定量的に示すことができた。
- 等価な車両諸元値と比較することによって, 着目すべき非定常空気力係数を特定し, 無視できない影響割合を持っていることを示した。
- 加振時の流速計測結果から, 車両表面流れの応答が重要であることが確認され, 着目すべき流れの考察を行うことができた。

今回の車両形状での検討においては、以下の結果が得られた。

- ◆ 細部形状(突起有り無し)による違いをまとめると、

【突起無し】 路面入力に対する上下・ピッチ運動の応答ゲイン大、遅れ小

路面への追従性が良い、路面ショック大 = “しっかりした感じ”

表面流速が速く、流れ応答(加減速・流量変化)が大きく、非定常空気力の発生大

【突起有り】 路面入力に対する上下・ピッチ運動の応答ゲイン小、遅れ大

路面のショックがやわらかい、路面追従性が劣る = “安定しないあいまいな感じ”

乱れのため、流れ応答が小さく、非定常空気力の発生が減少

- ◆ 着目すべき非定常空気力係数、および流れは、

【上下運動時】 フロントダンピング( $c_{fz}$ ) : 車両上下速度との走行風の合成風速

リヤイナータとリヤ一次遅れ( $m_{rz}/\tau_{rz}$ ) :

ルーフ・床下と側面間の流量変化と、フロントからの流れ伝達

【ピッチ運動時】 フロントばね( $-k_{f\theta}$ ) : ピッチ姿勢による流れの相対角度変化

リヤイナータ・リヤダンピング( $m_{r\theta}^*, c_{r\theta}^*$ ) :

ルーフ・床下と側面間の流量変化と、リヤ上下速度と走行風の合成風速

# 5. 結論

## 5.1. 全体まとめ

実際の車両形状を対象に、運動で発生する非定常空気力に着目し、細部形状の違いによる発生空気力の違いとそれによる車両挙動変化を、定量的に明らかにすることができた。それにより、車両の走行安定性向上のためには、非定常空気力の考慮が必要であることを示すことができた。以下に、明らかにした内容をまとめる。

1. 運動によって発生する非定常空気力を応答関数として定式化ができた。その空気力応答関数は、上下運動とピッチ運動で発生する空気力に分けられ、それぞれ空気イナータ・ダンピング・ばね、および 1 次遅れで表現できる。それにより、細部形状(ルーフ突起有り無し)による非定常空気力の違いを、定量的に示した。

(空気力応答関数での突起有り無しの比較)

【突起無し】ピッチ運動でのリヤ空気イナータ大 (ピッチ戻す方向)

【突起有り】ピッチ運動でのリヤ空気イナータは減少、空気ダンピング増加 (ピッチ促進方向)

2. 路面入力時の車両運動への非定常空気力の影響を、運動応答関数、および時系列シミュレーションで示した。それにより、細部形状(ルーフ突起有り無し)でも、車両運動に大きな影響を与えることを確認できた。また、非定常空気力は周波数特性を持つため、路面入力・サスペンション特性を同時に考えた解析が必要であることを示した。

(運動応答関数での突起有り無しの比較)

【突起無し】リヤ上下動応答大 (共振周波数高く・ゲイン大・位相遅れ小)

その結果、1.6 Hz 以上でピッチ大、1.2 Hz 以上で上下動大

【突起有り】リヤ上下動応答小 (共振周波数低く・ゲイン小・位相遅れ大)

その結果、1.6 Hz 以下でピッチ大、1.2 Hz 以上で上下動小

(時系列シミュレーションでの突起有り無しの比較)

【突起無し】ステップ応答 : ピッチ・上下運動ともに大

一定周波数路面：上下運動は大，ピッチ運動は，低周波で小／高周波大

【突起有り】ステップ応答：ピッチ・上下運動ともに小

一定周波数路面：上下運動は小，ピッチ運動は，低周波で大／高周波小

3. 細部形状(突起有り無し)による車両運動変化の解析予測結果が，実走行での車両運動計測により検証できた。また，その車両運動の変化とドライバーの感じ方評価の関係を結びつけることができた。

(実走行運動計測での突起有り無しの検証)

【突起無し】路面入力に対するピッチ・上下運動の応答ゲイン大

路面入力への追従性が良い = “しっかりした感じ” として感じる。

【突起有り】路面入力に対するピッチ・上下運動の応答ゲイン小

路面ショックがやわらかい，路面追従性が劣る

= “安定しないあいまいな感じ” と感じる。

4. 非定常空気力係数を等価な車両諸元値との比較を行うことで，無視できない影響割合を持っていることを示し，影響の大きい空気力係数を明らかにした。また，加振時の流速計測結果から，車両表面流れの応答が重要であることを示し，着目すべき流れの考察を行うことができた

(着目すべき非定常空気力係数，および流れ)

【上下運動時】 フロントダンピング ( $c_{fz}$ ) : 車両上下速度との走行風の合成風

リヤイナータとリヤ一次遅れ ( $m_{rz}/\tau_{rz}$ ) :

ルーフ・床下と側面間の流量変化と，フロントからの流れ伝達

【ピッチ運動時】 フロントばね ( $k_{f\theta}$ ) : ピッチ姿勢による流れの相対角度変化

リヤイナータ・リヤダンピング ( $m_{r\theta}^*, c_{r\theta}^*$ ) :

ルーフ・床下と側面間の流量変化と，リヤ上下速度と走行風の合成風

以上の得られた結果により，非定常空気力，および運動応答への影響を定量的に捉え，それを対応する流れ変化として理解しながら，さらにドライバーの感じ方につなげて示すことが可能となった (FIG. 5.1)。





## 5.2. 今後への展開

非定常空気力考慮の有用性が大きいことが確認できたことから、今回の観点での解析をさらに進め、実際の車両開発での性能向上に活用できるようにしていきたい。今回の解析法を用いた形状検討や、横運動への取り組み拡大が必要と考えら、具体的には、以下の項目をさらに進めていきたい。

1. 車両各部の細部形状変化、性能向上策による非定常空気力変化の計測と運動予測（形状検討）
2. 非定常空気力発生 of 流体的メカニズム解析（流れ解析）
3. 実車実験での非定常空気力計測（計測機、計測手法開発）
4. 横運動（横・ヨー・ロール）で発生する非定常空気力への取組み

それらより、走行するあらゆる場面での非定常空気力を定量的に評価し、そのコントロール技術を開発し、実際の走行での運動性能向上をさらに進めていきたい。

この観点での研究を進めることで、空気力を車速や入力周波数で特性の変わるもう1つ別のサスペンションと捉えることや、さらに横方向のサスペンションとして考えることが可能となる。空気力を積極的に活用することにより、今までとは違う車両運動特性を実現することが可能となり、車両の軽量化に等しい運動応答の良さ、今までにない乗心地の良さの実現、さらにそれらの両立が可能となることが期待できる。今後拡大していく自動運転に対しても、空気力の活用と自動制御を合わせて考えることで、制御しやすさによる走行安全の確保や、外乱による揺れを抑えた安定した走行につながられると考えられる。それらの実現に向け研究を進め、常に安定した走行で気持ちの良い移動が可能で、安全安心な車両の開発に寄与していきたい。

# References

- Arai, M., Tone, K., Murakami, M. and Oshima, M., Development of the Aerodynamics of the New Nissan Murano, SAE Technical Paper, No.2015-01-1542 (2015), DOI: 10.4271/2015-01-1542.
- Aschwanden, P., Müller, J. and Knörnschild, U., Experimental Study on the Influence of Model Motion on the Aerodynamic Performance of a Race Car, SAE Technical Paper, No.2006-01-0803 (2006), DOI: 10.4271/2006-01-0803.
- Cai, J., Kapoor, S., Sikder, T. and He Y., Effects of Active Aerodynamic Wings on Handling Performance of High-Speed Vehicles, SAE Technical Paper, No.2017-01-1592 (2017), DOI: 10.4271/2017-01-1592.
- Cogotti, A., Ground Effect of a Simplified Car Model in Side-Wind and Turbulent Flow, SAE Technical Paper 1999-01-0652 (1999), DOI: 10.4271/1999-01-0652.
- Ertveldt, J., Pintelon, R., and Vanlanduit, S., Identification of Unsteady Aerodynamic Forces from Forced Motion Wind Tunnel Experiments, AIAA Journal, Vol.54, No.10 (2016), pp.3265–3273, DOI: 10.2514/1.J054773.
- Gergmann, A., Huebner, A. and Loeser, T., Experimental and Numerical Research on the Aerodynamics of Unsteady Moving Aircraft, Progress in Aerospace Sciences, Vol.44, No.2 (2008), pp121–137, DOI: 10.1016/j.paerosci.2007.10.006.
- Ghoreyshi, M., Jirasek, A., and Cummings, RM., Computational Investigation into the Use of Response Function for Aerodynamic-load Modeling, AIAA Journal, Vol.50, No.6 (2012), pp.1314–1327, DOI: 10.2514/1.J051428.
- Howell, J. and Panigrahi, S., Aerodynamic Side Forces on Passenger Cars at Yaw, SAE Technical Paper, No.2016-01-1620 (2016), DOI: 10.4271/2016-01-1620.
- Hucho, W-H., Aerodynamics of Road Vehicles – 4th edition, SAE International (1998), ISBN-13: 9780768000290.
- Ikeda, J., Tsubokura, M., Nakae, Y., Unsteady Aerodynamics Simulation for the Road Vehicle in Combined Roll and Yaw Motion, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.82, No.835 (2016), DOI: 10.1299/transjsme.15-00675 (in Japanese).
- Kawakami, M., Sato, N., P. Aschwanden, Kato, Y., Nakagawa, M., 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, Vol.76, No.768 (2010), DOI: 10.1299/kikaic.76.2006 (in Japanese).
- Kawakami, M., Sato, N., Aschwanden, P., Mueller, J., Kato, Y., Nakagawa, M. and Ono, E., Validation and Modeling of Transient Aerodynamic Loads Acting on a Simplified Passenger Car Model in Sinusoidal Motion, SAE International Journal Passenger Cars - Mechanical Systems, Vol.5, No.1 (2012), pp324-339, DOI: 10.4271/2012-01-0447.
- Kawakami, M., Murata, O. and Maeda, K., Improvement in Vehicle Motion Performance by Suppression of Aerodynamic Load Fluctuations, SAE Technical Paper, No.2015-01-1537 (2015), DOI: 10.4271/2015-01-1537.
- Kitazawa, Y., Terakado, S., Ichikawa, H., Maeda, K., Hino, Y. and Tanaka, K., Impressive Coefficient of Drag: Development of Aerodynamic Performance for the New Prius, Toyota technical review, Vol.62 (2016), pp.71-77 (in Japanese)
- Kobayashi, N. and Yamada, M., Stability of a One Box Type Vehicle in a Cross-Wind-An Analysis of Transient Aerodynamic Forces and Moments, SAE Technical Paper 881878 (1988), DOI: 10.4271/881878.

- Kojima, Y., Ohta, Y., Effects of Nonlinear Aerodynamics on the Stability of the Longitudinal Motion of a High-Speed Surface Transport, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series C, Vol.62, No.601 (1996), pp.138–143 (in Japanese).
- Kuratani, N., Sawada, J., Suwa, Y. and Ogawa, A., Effects of Vehicle Dynamic Motion on Unsteady Aerodynamic Performance and Flow Characteristics, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.49, No.2 (2018), pp. 434–440, DOI: 10.11351/jaseronbun.49.434 (in Japanese).
- Koyama, T., Fujino, M. and Maeda, H., Dynamics of Ships and Offshore Structure, SEIZANDO-SHOTEN (1982), ISBN-13:9784425711031 (in Japanese).
- Maeda, K. and Sakai, H., Analysis of Aerodynamic Effects on the Vehicle Stability in High Speed Running -Influence of Aerodynamic Rolling and Yawing Moment on the Rolling Behavior, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.26, No.3 (1995), pp. 86–90 (in Japanese).
- Maeda, K., Sakai, H. and Tomiyama, M., The Development of a Method to Obtain the Optimum Lift Coefficient Using the Vehicle Dynamic Analysis, Proceedings of the International Symposium on Advanced Vehicle Control (1996), pp. 427–441.
- Maeda, K., Development of Automotive Aerodynamics and Approach Trend, Journal of Wind Engineering, Vol.36, No.3 (No. 128) (2011), pp. 242–249, DOI:10.5359/jawe.36.242 (in Japanese).
- Maeda, K., Tsubakino, D., Hara, S. and Sasoh, A., Investigations of Unsteady Aerodynamic Effects Generated by Heave and Pitch Motion in Different Vehicle Body Shapes with Model Excitation Tests, Mechanical Engineering Journal, Vol.7, No.5 (2020), DOI: 10.1299/mej.20-00276.
- Maeda, K., Tsubakino, D., Hara, S. and Sasoh, A., Coupling Analysis of Unsteady Aerodynamics and Vehicle Behavior with Road Input: Modeling and Verification in Road Tests, Mechanical Engineering Journal (2021), DOI: 10.1299/mej.21-00095.
- Maruyama, R., Shinji, K., Nonomura, T. and Asai, K., Effects of Heaving and Pitching Motions on Underside Aerodynamics of a Sedan Vehicle, Journal of Fluid Science and Technology of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.14, No.2 (2019), DOI: 10.1299/jfst.2019jfst0012.
- Mayer, W. and Wickern, G., The New Audi A6A7 Family - Aerodynamic Development of Different Body Types on One Platform, SAE Technical Paper, No.2011-01-0175 (2011), DOI: 10.4271/2011-01-0175.
- Murphy, PC., Klein, V. and Frink, NT., Nonlinear Unsteady Aerodynamic Modeling Using Wind-Tunnel and Computational Data, Journal of Aircraft, Vol.54, No.2 (2017), pp.659–683, DOI: 10.2514/1.C033881.
- Nakae, Y., Ikeda, J., Yasuki, T., Tanaka, H., Yamashita, T., Tsubokura, M., Nakashima, T., A Study of Unsteady Aerodynamic Forces Acting on Car in Dynamic Motion, Transactions of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.44, No.6 (2013), pp.1471–1476, DOI:10.11351/jsaeronbun.44.1471 (in Japanese).
- Nakashima, T., Tsubokura, M., Ikenaga, T., and Doi, Y., HPC-LES for Unsteady Aerodynamics of a Heavy Duty Truck in Wind Gust - 2nd report: Coupled Analysis with Vehicle Motion, SAE Technical Paper 2010-01-1021 (2010), DOI: 110.4271/2010-01-1021.
- Nastov, A. and Caples, D., Aerodynamic Development of the 2019 Chevrolet Corvette C7 ZR1, SAE Technical Paper, No.2019-01-0665 (2019), DOI: 10.4271/2019-01-0665.
- Nishiura, M., Ichikawa, H. and Yasuoka, S., Aerodynamic Technology Which Balances Fuel Economy, Dynamic Performance and Style, Proceedings of the JSAE Annual Congress (autumn), 49-20135809 (2013), p.1–4, (in Japanese).

- Okada, Y., Nouzawa, T., Nakamura, T. and Okamoto, S., Flow Structure 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 Technical Paper, No.2009-01-0004 (2009), DOI:10.4271/2009-01-0004.
- 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 Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.80, No.809 (2014), DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0009.
- Ogawa, A., Mashio, S., Yano, S., and Kawamura, T., Quantitative Representations of Aerodynamic Effects on Handling Response and Flat Ride of Vehicles, SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems Vol.5, No.1 (2012), pp.304-323, DOI: 10.4271/2012-01-0445.
- Palin, R., Johnson, V., Johnson, S., D'Hooge, A., Brandley, D. and Gargoloff, J., The Aerodynamic Development of the Tesla Model S - Part 1: Overview, SAE Technical Paper, No.2012-01-0177 (2012), DOI: 10.4271/2012-01-0177.
- Pascal, T., Johannes, W., Kirstin, H., Rainer, D., Tomas, I. and Nikolaus, A., Experimental Investigation of Unsteady Vehicle Aerodynamics under Time-dependent Flow Conditions - Part 1, SAE Technical Paper, No.2011-01-0177 (2011), DOI:10.4271/2011-01-0177.
- Passmore, MA. and Mansor, S., The Measurement of Transient Aerodynamics Using an Oscillating Model Facility, SAE Technical Paper, No.2006-01-0338 (2006), DOI:10.4271/2006-01-0338.
- Pinheiro, H., Ferraris, A., Polato, D., Carello, M. and Airale, A., City Car Drag Reduction by Means of Flow Control Devices, SAE Technical Paper, No.2020-36-0080 (2020), DOI: 10.4271/2020-36-0080.
- Saito, N., Yamada, K., Improving Vehicle Dynamics using the Aerodynamic Effect of Aero Stabilizing Fins, Toyota technical review, Vol.58, No.1 (2012), pp.64-69 (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 (4th Report, Unsteady Aerodynamic Analysis around a Simplified Car Model in Pitch Motion), Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B, Vol.77, No.773 (2011), pp.43–55, DOI:10.1299/kikaib.76.770\_1515 (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, No.2011-01-0154 (2011), DOI: 10.4271/2011-01-0154.
- Schuetz, T., Aerodynamics of Road Vehicles – 5th edition, SAE International (2015), ISBN-13: 9780768079777.
- Sterken, L., Sebben, S., Lofdhl, L., Walker, T. and Wolken, T., Wake and Unsteady Surface-Pressure Measurements on an SUV with Rear-End Extensions, SAE Technical Paper, No.2015-01-1545 (2015), DOI: 10.4271/2015-01-1545.
- Sumitani, K., Current Situation on Development of Vehicle Aerodynamics, Fluids Engineering Conference of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.85, WS2-1 (2007), DOI:10.1299/jsmfed.2007.\_WS2-1-a\_ (in Japanese).
- Takeuchi, E., Maeda, K. and Murata, O., Effects of Unsteady Aerodynamic Forces to the Vehicle Dynamics, Proceedings of the JSAE Annual Congress (spring), 192-2009-5290 (2009), p.1–4, (in Japanese).
- Tomiyaama, M., Maeda, K. and Nakamura, F., Analysis of Aerodynamic Effects on the Vehicle Stability in High Speed Running, JSAE Review of Society of Automotive Engineers of Japan, Vol.23, JSAE200224011 (2002), pp. 69–74.
- 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, DOI: 10.4271/2012-01-0446.

Yamashita, T., Sugita, Y., Asano, T. and Maeda, K., Unsteady Aerodynamic Effects to the Vehicle Dynamics Caused by Pitch motion, Proceedings of the JSAE Annual Congress (Spring), 322-20115014 (2011), pp. 1–4.

Yamashita, T., Makihara, T., Maeda, K., and Tadakuma, K., Unsteady Aerodynamic Response of a Vehicle by Natural Wind Generator of a Full-Scale Wind Tunnel, SAE International Journal Passenger Cars - Mechanical Systems Vol.10, No.11 (2017), pp358-368, DOI: 10.4271/2017-01-1549.

# 謝辞

本研究をまとめるにあたり、名古屋大学、佐宗章弘教授からは、終始前向きに新たな発見を目指す姿勢を求める丁寧なご指導をいただきました。先生には、社会人学生として受け入れていただき、企業内での研究とは違う学びの機会により、新たな領域へ取り組む気持ちを励起していただきました。本論文をまとめるのにあたっては、研究の価値、位置づけ、意義を明確するご指導をいただき、内容をより深めることができたと考えております。本論文には入れられなかった研究についても、その発展可能性を後押しして頂きました。また、社会人学生であるためのご配慮を多くいただきました。心より感謝いたします。

本研究を進める中で必要となった制御の考えによる空気力の整理においては、名古屋大学、原進教授、椿野大輔講師から、多くのご指導を頂きました。曖昧な理解であった知識を正確にさせていただくことで、新しい整理が可能になったと考えております。原進先生には、さらに論文の価値を高める表現、取り組みの考え方についても貴重なご助言を頂き、気づかされるが多かったと思っております。深く感謝しております。椿野先生には、実際のデータまで確認いただきながら、制御に関する知識を具体的にご指導いただき、理解を深めることができました。厚く感謝申し上げます。

副査を務めて頂きました、名古屋大学、井上剛志教授には、空気力と運動の定式化の考え方、現象の物理的理解についてのご指導、ご助言を頂き、本論文のまとめ際し、わかりやすく整理することができました。厚く御礼申し上げます。

また、本研究の検討を可能とした本研究で使用した風洞内での加振試験装置について、その開発にあたり、日章電機株式会社 東島鎮かく氏、およびトヨタ自動車株式会社 山下太郎氏の協力と尽力に感謝いたします。アイデアを実現し、計測を可能とした装置開発により、今回の研究が可能となっており、非常に優れたものを製作頂いたと考えております。合わせて、本研究の中での風洞加振実験、実際の走行での計測を実施いただいた、トヨタ自動車株式会社 杉本満氏には、その多数にわたる計測を正確に続けていただいたご尽力に感謝いたします。良い車両の開発につながる研究ができたと考えております。

さらに、社会人学生として大学に通う機会を与えて頂きました、トヨタ自動車株式会社の上司およびメンバーの皆様には、業務の調整、通学へのご理解に感謝いたします。

令和3年7月

# 発表論文

本研究の内容の成果を投稿した論文を以下に記す.

Maeda, K., Tsubakino, D., Hara, S. and Sasoh, A., Investigations of Unsteady Aerodynamic Effects Generated by Heave and Pitch Motion in Different Vehicle Body Shapes with Model Excitation Tests, Mechanical Engineering Journal, Vol.7, No.5 (2020), DOI: 10.1299/mej.20-00276.

(第2章, および第4章4節の内容に該当)

Maeda, K., Tsubakino, D., Hara, S. and Sasoh, A., Coupling Analysis of Unsteady Aerodynamics and Vehicle Behavior with Road Input: Modeling and Verification in Road Tests, Mechanical Engineering Journal (2021), DOI: 10.1299/mej.21-00095.

(第3章, および第4章1～3節の内容に該当)