A108

Large-Eddy Simulation を用いた セダンタイプ乗用車のトランクデッキ上の流れ構造の可視化

中島 卓司[○](広島大学), 坪倉 誠(北海道大学), 農沢 隆秀(マツダ株式会社)
中村 貴樹(マツダ株式会社), 岡田 義浩(マツダ株式会社)

Visualization of flow structures above the trunk deck of sedan-type passenger cars using Large-Eddy Simulation

Takuji NAKASHIMA, Makoto TSUBOKURA, Takahide NOUZAWA,
Takaki NAKAMURA and Yoshihiro OKADA

ABSTRACT

In the present study, in order to investigate a mechanism of an influence of unsteady vehicle aerodynamics on a vehicle running stability, Large-Eddy Simulations on two simplified vehicle models are conducted. The target vehicle models are designed from real sedan-type passenger cars with different high-speed running stability. Flow structures around the simplified vehicles, especially above their trunk deck, are visualized from the numerical results. Numerical visualizations of the flows around the vehicles with forced pitch oscillation are also conducted in order to investigate interactions between the vehicle's motion and the flows. Differences of flow structures and their responses, which may relate to the high-speed running stability, are extracted and discussed based on the visualizations.

Keywords: 自動車空力、Large-Eddy Simulation、流れ構造

1. 緒 論

近年、自動車の車両空力分野では、非定常空力特性の重要性が注目されている。従来、自動車車両の空力特性については、一様流中で計測された時間平均値に基づく評価がなされてきた。しかしその一方で、風洞試験と路上実走行では空力特性の評価に差異が生じる場合があり、その一要因として一様流中の時間平均値としては表れない非定常空気力の影響が指摘されてきた。また、近年の研究報告¹⁾³⁾では、車両姿勢変化や大気乱れなど多くの観点から非定常流体現象の重要性が指摘されている。その現象把握には非定常流れの可視化技術が必要不可欠であり、同可視化技術は今後より高度な自動車空力設計を実現するための重要な役割を担うと期待される。

そこで本研究では、高速走行安定性に対してその非定常特性の影響が大である(岡田ら¹⁾⁴⁾、秋山ら²⁾)と指摘されたセダンタイプ乗用車周りの流れ構造に着目し、車両周りの流れの非定常特性が走行安定性に影響するメカニズムを解明するため、安定性の異なる車両をそれぞれモデル化した簡易車両モデル周りの流れ場を対象とした Large-Eddy Simulation (LES) による流れの可視化を行った。静止状態および強制ピッチ運動による動的状態における車両モデル周囲乱流場の数値解析を実施し、そ

の解析結果から車両周囲の流れ構造を可視化して、2種の車両モデル間における流れ構造とその車両運動に対する応答性の差異を検証した。また、それらが高速安定性に影響するメカニズムについて検討した。

2. 数値解析対象およびその手法

2.1 解析対象

本研究では解析対象として、一宮ら⁵⁾が用いた、高速安定性の異なる2種のセダンタイプ乗用車を模擬した1/5スケール簡易車両モデルを用いた。ただし簡単のため、一宮ら⁵⁾の風洞試験モデルから車体支持柱を除いている。対象形状である2種のモデル形状をFig. 1に示す。モデル寸法は、長さ210mm (L)、幅80mm (W)、高さ65mm (H)である。両モデル間の差異はフロントピラー

Fig. 1 Simplified vehicle model

およびリアピラーの形状であり、これは岡田らによる実車試験^{1),4)}において異なる高速走行安定性を示した2車種における特徴的差異の一つである。ここでは、高速安定性の低い車両を模擬したモデルをモデルA、安定性が高い車両を模擬したモデルをモデルBと称する。

2.2 解析条件

解析領域は Fig.2 に示す矩形領域とし、図のように車両モデルを床下高さ $0.23H$ として配置した。モデル表面および床面には対数則に基づく壁法則を適用した。ただし、床面境界層の過度な発達を抑制するため、モデルから $0.14L$ 上流よりも入口側の床面はすべり床とした。また、解析領域側面および上面についても、すべり境界と仮定した。流出境界は自由流出条件とした。

流入境界条件として、一様流速 $U_0 = 16.7\text{m/s}$ を与えた。車長 L に基づくレイノルズ数 Re は 2.3×10^5 である。

Fig. 2 Computational domain.

簡易車両モデルの起源である実車計測^{1),2),4)}では、特に後部車高の変化の差異が2車種間で顕著であったこと、およびトランクデッキ上の圧力と車高変化との相関に差異がみられたことが報告されている。そこで本研究では、後部車高の変化を車両ピッチ角の変化で表現することとした。一宮らの風洞実験モデル⁵⁾に基づき、Fig.3 のようにピッチ角およびモーメントの中心を定義した。また、ピッチ角、同モーメントともに、正方向は図に示す矢印の向きとして定義した。

解析では、ピッチ角を $0, 4$ 度で固定した静止条件、およびピッチ角を 0 度から 4 度の間で振幅 2 度の正弦振動をさせた動的条件を対象とした。ここで、強制振動の振動周波数は 10.0Hz とした。一様流速 U_0 と車長 L による Strouhal 数 St は 0.13 であり、これは実車計測^{1),2),4)}における車高変化が示した St 数と同オーダーである。

Fig. 3 Definition of a pitch angle.

2.3 基礎方程式

緒論にも述べた通り、本研究では車両モデル周囲流れの数値解析に LES による乱流モデリングを適用して、非定常乱流場の解析を行った。このための基礎方程式として、非圧縮性の Navier-Stokes 方程式系に空間平均操作を施したものを用いた。以下に、SGS 運動量流束を渦粘性モデルによって近似した基礎方程式を示す。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial}{\partial x_j} (\nu + \nu^{\text{SGS}}) \bar{S}_{ij} \quad (2)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

$$\bar{P} = \bar{p} / \rho + (\bar{u}_i \bar{u}_i - \bar{u}_i \bar{u}_i) / 3 \quad (4)$$

ここで、変数の上線 $\bar{f}$ は物理量 f を空間フィルタにより平均化した値であることを表している。また、 ν^{SGS} は SGS 乱流動粘性係数であり、標準 Smagorinsky モデル⁶⁾を用いて、

$$\nu^{\text{SGS}} = (C_s f_d \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (5)$$

とした。ここで、 Δ は有限体積の3乗根で与えられる格子幅であり、 f_d は壁面近傍で乱流動粘性を減衰させる Van-Driest の減衰関数である。Smagorinsky 定数 C_s には、外部流に対する最適値とされる 0.15 を用いた。

また、ピッチ角に動的変化を与える動的条件での解析においては Arbitrary Eulerian-Lagrangian (ALE) 法⁷⁾を用いて解析格子を変形させ、モデル表面境界の位置を変化させることで車両の姿勢変化を表現した。

2.4 数値手法

本研究における解析には、次世代流体解析コード FrontFlow/red^{8),9)}をベースとした非定常車両空力解析コード FrontFlow/red-Aero を用いた。同コードは、節点ベースの非構造格子有限体積分法を使用し、陽解法による時間進行時には SMAC アルゴリズムを使用した流体解析コードである。離散化手法として、時間積分法に陽解法の2次精度 Adams-Bashforth 法を用いた。時間離散間隔 Δt は静止条件では 2.0×10^{-6} 秒、動的条件では 1.0×10^{-5} 秒とした。空間微分項に関しては、対流項の離散化に2次中心スキームをベースに5%の1次精度風上成分を付加した混合スキームを用い、その他の空間離散化には2次中心スキームを用いた。

2.5 解析格子

本稿の静止状態の解析で用いた解析格子は主に三角錐要素で構成された非構造格子であり、両モデルともにモデル表面上の空間解像度は稜線部で 0.5mm とした。また、モデル表面には厚さ 0.1mm の三角柱（プリズム）格子を8層挿入している。要素数はともに約700万要素、節点数は約150万点である。モデル周囲の中央断面上格子およびモデル表面格子を Fig.4 に示す。

Fig. 4 Computational grid (Model A).

なお、動的条件下においては格子変形に伴って計算負荷が増大するため、静止状態の解析格子に比べ空間解像度の低いものを用いた。要素数はともに約 200 万要素、節点数は約 50 万点である。

3. 結果と考察

本章では、前章で述べた簡易車両モデル周りの流れ場の数値解析による解析結果とその可視化を示し、車両走行安定性に周囲流れが与える影響について検討する。

ピッチ角が 0 度および 4 度に固定された静止条件により、静的および準静的な流れ場の特性を把握するとともに、0 度から 4 度の間を強制的に正弦振動させた動的条件により、動的な車両姿勢変化による非定常空気力の発生とその影響について検討した。いずれの条件においても、特にトランクデッキ上部における流れ構造とその特性に注目して解析結果の可視化を行い、車両走行安定性への影響について議論を行う。

3.1 定常流れ構造の可視化

はじめに、ピッチ角 0 度で固定した静止状態の車両モデル周り流れ場の解析結果から、渦度等値面 ($|\omega| = 1.0 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$) により可視化した車両周囲渦構造を Fig.5 に示す。鋭いフロントピラーを有するモデル A では、フロントピラーが縦渦を形成し、その縦渦はトランクデッキ上方でリアピラーが形成した縦渦と上下に対を成す。一方、モデル B では、フロントピラーの曲率が小さく、縦渦がほとんど形成されず、トランクデッキ上に現れる渦構造は鋭いリアピラーが形成した縦渦のみである。

さらにトランクデッキ上流れの差異を明らかにするため、トランクデッキ上の車幅方向垂直断面内における流速分布を Fig.6 に示す。図には、主流流速コンタと断面内流速ベクトルを併せて示した。モデル A では、上下に対となった前後ピラーからの縦渦が車両側方からトランクデッキ上方への流れを助長し、車幅方向の変化が大きい 3 次元流れがトランクデッキ上に形成されている。一方、モデル B では、リアピラーからの縦渦が側方から

Fig. 5 Time-averaged vortex structures around the vehicle models.

Fig. 6 Time-averaged velocity distributions above the trunk decks. (Rear view. Color contour shows streamwise velocity [m/s]. Yellow planes in additional figures show the visualized cut-planes.)

の流れを阻んでおり、トランクデッキ上部の流れ構造は車幅方向に一樣な 2 次元流れに近い。このように、前後のピラー形状の差異によって、トランクデッキ上部の定常流れ構造が異なることが示された。

3.2 非定常渦構造の可視化

次に、圧力のラプラシアン (Δp) の等値面によって可視化したトランクデッキ上の瞬時渦構造を Fig.5 に示す。図は時系列で 3 時刻分の瞬時画像である。両モデルが形成する瞬時渦構造を比較すると、モデル A においては、後部窓上方からの渦放出が連続的に生じており、複雑な

(a) Model A

(b) Model B

Fig. 7 Time-averaged vortex structures around the simplified vehicles at $\theta_{pitch} = 0$ and 4 deg.

渦構造がトランクデッキ上方に形成されているのに対して、モデル B において後部窓上方からの渦放出が間欠性を有しており、トランクデッキ上を通過する瞬時渦は疎らである。モデル B 上段の可視化画像では、間欠的に放出されるヘアピン状の渦の放出（図中矢印(A)）が確認できる。また、その渦がトランクデッキ上を通過した際に、リアピラーが形成した縦渦の一時的な崩壊（図中矢印(B)）を誘起することで、トランクデッキ上方全般にわたって流れ構造が大きく乱され、現象に強い間欠的を与える。一方、モデル A ではリアピラーが形成した縦渦は安定しており、連続的な渦放出によってトランクデッキ上方の流れ構造が大きく変化することはない。

以上のように、両モデル間では時間平均した流れ構造のみならず、非定常的な流れ場の特性も大きく異なることが示された。このことは、流れ場が有する代表時間と

同オーダーもしくはそれ以下の短い時間スケールで生じる動的な車両姿勢変化に対しても、両モデル間で流れ場の応答が異なる可能性を示唆している。

3.3 準定常的なピッチ変化に伴う流れ構造の変化

次に、前節まで述べた車両周囲の流れ構造が、車両の準定常的な姿勢変化に伴って受ける影響を明らかにするため、ピッチ角を 4 度に固定した静止車両モデル周り流れ場の数値解析を行い、可視化結果をピッチ角 0 度の際の流れ場の結果と比較した。3.1 節の Fig.5 と同様に渦度等値面を用いて車両周囲渦構造を可視化し、異なるピッチ角（ 0 度および 4 度）の車両モデル周りに形成される流れ構造の比較を Fig.7 に示す。

モデル A では、ピッチ角がつくことによりトランクデッキ上方で上下に対をなす前後ピラー渦が互いに接近し、ピッチ角 0 度の状態よりも両縦渦間の相互作用が強まることによって、車両側方からトランクデッキ上方に向かう流れが促進される。一方、モデル B ではリアピラーと主流がなす角が緩やかになるため、リアピラーが形成する縦渦が弱まっている。

以上のように、両モデル間では準定常的なピッチ変化に伴うトランクデッキ上方の流れ構造の変化が異なることが示された。またこれらの差異が車両空力に与える影響として、トランクデッキ部に作用する車両下向き空気

Fig. 8 Time-averaged vortex structures around the simplified vehicles at $\theta_{pitch} = 0$ and 4 deg.

力の変化を比較したところ、モデル A ではピッチ角の増大に伴う下向き力が 3.7% の増加に留まったのに対し、モデル B では 13.5% 増加した。

以上のことから、ピラー形状の差異によって生じたトランクデッキ上方の異なる流れ構造が、準定常的なピッチ角の変化に対して異なる応答を示し、高速走行安定性が高い車両を模擬したモデル B が、より強くピッチ角増加を抑制する応答をすることが示された。

3.4 動的ピッチ変化に伴う流れ構造の変化

続いて、車両の動的姿勢変化と車両周囲の流れ場との相互作用の影響を検証するため、ピッチ角を 0 度から 4 度の間で正弦振動させた動的条件下における車両モデル周囲流れ場の数値解析を実施した。

両モデル全体およびトランクデッキ上面に作用するピッチングモーメントに対し、ピッチ変動の位相で位相平均操作を施したモーメントの変動グラフを Fig. 9 に示す。図 (a) に示したモデル全体に作用するモーメントでは、動的なピッチ角の変化に伴う非定常的なピッチモーメントの変化が生じている一方で、両モデル間ではその変動プロファイルが類似しており、変動振幅や位相における差異は明確ではない。また、その変動は、ピッチ角に対して 1/4 周期遅れた位相となっており、両モデルともピッチ角速度を打ち消す向きに非定常空気力を生じていることが分かる。しかし、図 (b) に示したトランクデッキ上に作用するピッチモーメントでは、モデル A がモデル全体

(a) Acting on the whole models

(b) Acting on the trunk decks.

Fig. 9 Phase-averaged pitch moments.

の場合と同様に 1/4 周期遅れた変動を示しているのに対して、走行安定性の高いと考えられるモデル B はピッチ角変動から 1/2 周期遅れたピッチモーメントの変動を示している。これは、前項で示した車両姿勢変化を安定化する準定常的な応答が、動的条件下でも有意であることを意味している。

非定常空気力を生じる要因を調査するため、Fig. 10 に

Fig. 10 Distribution of Phase-averaged pressure coefficient on the vehicle body at $\theta_{pitch} = 2.0$ deg. (Upper: Top surface, Lower: Bottom surface).

ピッチ角の変動位相 0 度および 180 度における車両上下表面の位相平均圧力分布を示す。このとき、ピッチ角はいずれも 2 度である。動的なピッチ角変化の影響で、ピッチ角が増大する位相 0 度よりもピッチ角が減少する位相 180 度では圧力分布が異なっており、特に車両床下の圧力は両位相間での差は両モデルともに顕著である。また、トランクデッキ上の圧力分布についても、両位相間では圧力分布が異なっている。しかし、モデル A では位相間で車幅方向圧力分布の変化が大きく、デッキ上の側方で圧力分布の傾向に変化が見られるのに対して、モデル B では圧力変化の影響範囲が狭く、分布の傾向までは変化が見られない。これは、Fig.9-(b)のピッチモーメント変化において、ピッチ角速度への応答が顕著であったモデル A と準定常的な応答が顕著であったモデル B との差異の要因となっていると考えられる。

4. 結論

車両周りの流れの非定常特性が走行安定性に影響するメカニズムを解明するため、高速走行安定性の異なるセダン車両 2 種をモデル化した簡易車両モデル周りの流れ場を対象とした Large Eddy Simulation (LES) による流れの可視化を行った。ピッチ角の異なる複数の静止状態および強制ピッチ運動による動的状態における車両モデル周囲乱流場の数値解析を実施し、その解析結果から車両周囲の流れ構造を可視化して、2 種の車両モデル間における流れ構造とその車両運動に対する応答性の差異を検証した。その結果、以下のような事実が示された。

- 2 種の車両モデル形状の相違点であるピラー形状の差異によって、トランクデッキ上方に形成される流れ場が大きく変化する。
- 高速走行安定性の高い車両を起源とするモデル B では、トランクデッキ上の流れが車幅方向に一樣な 2 次元流となるのに対して、安定性が低いと考えられるモデル A では、車両側方からトランクデッキ上方へ回り込む流れがあり、3 次元流の流れ構造を形成する。
- 準定常的なピッチ方向の姿勢変化に対して、上述の流れ構造の応答、特に前後のピラーが形成する渦構造の相互作用の変化が異なることで、トランクデッキ上に作用する下向き空気力の変化に差異が生じた。この差異は、車両の準定常的なピッチ姿勢変化に対する抑制力の差異に相当することから、上述の流れ構造およびその応答の差異が、車両走行安定性の差異の要因である可能性が示唆された。
- 強制的なピッチ変動を与えた動的条件下では、両モデルともに類似な非定常空気力を生じた。ピッチモーメントにおける非定常成分は、車両全体ではピッチ角速度を打ち消す成分が主であった。ただし、トランクデッキ上に作用するモーメントに関しては、両モデル間でおおよそ 1/4 周期の位相差があり、走行

安定性の高いモデルでは、ピッチ角変化を抑制する向きに働く準定常的な応答成分が有意な大きさを持つことが示された。

以上のように、車両周囲の流れ構造と車両姿勢変化に対するそれらの応答が 2 種のモデル間で異なっており、その流体力学的差異によって車両安定性の違いが生じている可能性が示唆された。

5. 謝辞

本研究で使った解析プログラムは、文部科学省 IT プログラム「FSIS 戦略的基盤ソフトウェアの開発」⁹⁾および文部科学省次世代 IT 基盤構築のための研究開発「RSS21 革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」⁹⁾によって開発と実証が行われた次世代流体解析コード FrontFlow/red^{8),9)}を基盤としている。本研究は、平成 19 年度産業技術研究助成事業の援助を受けた。本研究にあたって実施した数値解析には、東京大学情報基盤センタのスーパーコンピュータ SR11000/J2 を利用した。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 岡田義浩ら：自動車のトランクデッキ部における境界層構造が壁面上の非定常圧力変化に与える影響，日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会 CD-ROM 版講演論文集，2007 年 11 月，講演番号 211.
- 2) 秋山裕介ら：セダントタイプの自動車のトランクデッキ上の流れ構造と高速安定性へ与える影響，可視化情報シンポジウム講演論文集，2009 年 7 月，講演番号 P09-006 (講演予定)
- 3) Watkins, S. and Cooper, K.: The Unsteady Wind Environment of Road Vehicles, Part Two: Effects on Vehicle Development and Simulation of Turbulence, SAE paper no. 2007-01-1237, 2006.
- 4) Okada, Y. *et al.*: Flow structures above the trunk deck of sedan-type vehicles and their influence on high-speed vehicle stability 1st report: On-road and wind-tunnel studies on unsteady flow characteristics that stabilize vehicle behavior, SAE paper no. 2009-01-0007, 2009.
- 5) 一宮昌司，秋山裕介：振動時の自動車モデル上の圧力変動，日本機械学会第 85 期流体工学部門講演会 CD-ROM 版講演論文集，2007 年 11 月，講演番号 212.
- 6) Smagorinsky, J.: General Circulation Experiments with Primitive Equations, Monthly Weather Review, Vol. 91, No. 3, 1963, pp. 99-164.
- 7) Hirt, C. W. *et al.* An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Computing Method for All Flow Speeds. J. Comp. Phys. 1974, 14, p. 227-253. FSIS
- 8) "Frontier Simulation Software for Industrial Science (FSIS)", <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/fsis/en/>
- 9) "Revolutionary Simulation Software (RSS)", <http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/rss21/en/>