E108 LESによる車両非定常空力メカニズムの可視化解析

坪倉 誠[○] (北海道大学), 中島 卓司 (広島大学), 農沢 隆秀 (マツダ (株)),
中村 貴樹 (マツダ (株)), 張 会来 (アドバンスソフト (株)),
大島 伸行 (北海道大学)

Numerical Visualization for Unsteady Aerodynamics of Road Vehicles

Makoto TSUBOKURA, Takuji NAKASHIMA, Takahide NOUZAWA, Takaki NAKAMURA,
Huilai ZHANG and Nobuyuki OSHIMA

ABSTRACT

In the previous study, we developed the unstructured-grid LES code "FrontFlow/red" under the national project called "Revolutionary Simulation Software", and modified the code for the execution on the Earth Simulator to respond to the full-scale vehicle aerodynamics. The objective of this study is to validate the HPC-LES method for the prediction of *unsteady* aerodynamic forces acting on road vehicles in such conditions as sudden steering action, overtaking, or cross wind. The unsteady aerodynamic forces can be explained as a solid-fluid interaction problem caused by organized eddy structures around a vehicle body. Accordingly unsteady flow visualization using LES will be a promising method for the problem. We applied the method to a full-scale production vehicle on which reliable wind-tunnel visualization had been acquired, and validated the method in the context of the reproduction of the eddy structures. We then studied the unsteady aerodynamics forces acting on the vehicle during the dynamic yaw-angle change, and their relationships with transient flow structures were focused. As a result, we have demonstrated that the HPC-LES can be a dominant aerodynamic assessment tool for the next generation, which will contribute to innovative aerodynamic vehicle design.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, High Performance Computing, Large Eddy Simulation, Vehicle Aerodynamics, Unsteady Aerodynamic Force

1. 緒 論

自動車の燃費や走行安定性を評価する場合、空気力学的特性として時間平均的な抗力 (C_d 値) や揚力 (C_l 値) が用いられるのが一般的である。これに対して、急な横風やハンドル操作、さらには追い越し等に伴う過渡的な非定常空力特性については、自動車の走行安定性や安全性の確保の観点からその重要性は認識されつつも、風洞実験による計測が難しく、有効な評価手法の構築が望まれている。

筆者らは風洞実験に変わる新たな空力予測システムとしてラージエディシミュレーション (LES) の有用性に着目し、文科省次世代 IT プログラム「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発 (RSS21) ¹⁾」プロジェ

クトで開発された次世代流体解析システム FrontFlow/red (FFR) を基盤として、次世代非定常空力シミュレータの確立を目指している。まず、複雑な自動車形状を詳細に再現するための大規模 LES を実現すべく、ハイパフォーマンスコンピューティング (HPC) 技術に基づきソフトウェアの改良を行い、億要素規模の空力解析²⁾を実現した。

本研究では特に、非定常空力特性評価に対する有用性を検討するために、HPC-LES シミュレータを市販車に適用し、車両の動的姿勢変化に伴う非定常空力予測を行った。数値解析結果から、車体周りの流れ構造を可視化することで、急な横風やハンドル操作に伴う非定常空力と渦構造との関係を明らかにし、その発生物理メカニズムの解明を目指す。

2. 数値解析手法

2.1 基礎式と離散化手法

LES の基礎式は、以下に示す空間平均操作された連続の式、及びナビエ・ストークス方程式で表される。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0,$$

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

ただし、

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

$$P = p / \rho + u_i u_i / 3,$$

である。式中の u , P , ν と ρ はそれぞれ速度、圧力、動粘性係数、密度を表している。渦粘性係数 ν_{SGS} については、次に示すスマゴリンスキーモデルでモデル化される。

$$\nu_{SGS} = (C_s f_s \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$$

ここで Δ は計算要素体積から算出した長さスケール、 f_s は Van-Driest の減衰関数であり、壁面近傍の乱流減衰効果をモデル化している。モデル係数は $C_s=0.15$ で与えている。

基礎式は、非構造有限体積法に基づき離散化される。空間離散化については二次中心差分法を用い、対流項に対してのみ数値振動を抑えるために MUSCL 法を採用している。速度と圧力のカップリングは SMAC 法に基づき、時間進行は 2 次精度のアダムスバッシュフォース法を用いている。詳細については文献³⁾を参照されたい。

2.2 解析対象と境界条件

Fig.1 に本研究で解析した実物大（車長 4.7m、車幅 2.0m、車高 1.6m）の市販セダン車と解析領域を示す。ここでは詳細な空力性能を予測するために、エンジンルームや床下等の複雑形状を考慮した解析を実施する（ただし空力特性に影響の無いと想定される範囲で、若干の簡略化はなされている）。解析領域は図のような流れ方向に車長の 13 倍の閉空間流路を想定し、閉塞効果を極力小さくする為に、スパン方向に車長の 10 倍、床垂直方向に 5 倍としている。

数値境界条件は、風洞実験を模擬して与える。流入風は 39m/s の一様流とし、流路出口では勾配ゼロ条件とする。風洞側壁と天井には自由滑り条件を与える。風洞床については、実験で車体前方床に設置されている境界層吸込み装置を考慮して、境界層が発達しないように流路入口から車体前方部分まで（図中影部分）は自由滑り条件とし、そこから後方については固体壁としている。ま

た、車体表面についても同様に固体壁としているが、本解析では境界層を十分解像するための要素を壁面近傍に配置することが困難なため、十分発達した乱流境界層を想定した対数則分布を主流速度に対して仮定し、壁面ではこの主流速度に対応した摩擦応力を与えている。この結果、車体表面に対しては、最も壁面から離れた場合で、壁座標で $y^+ \sim 150$ 程度であった。

数値解析格子の作成には、テトラ格子による非構造格子を採用し、Fig.1 の解析領域に対しておおよそ 4000 万程度の要素数、700 万点程度の節点数を用いた。この場合の車体表面解像度は 1cm 程度であった。解析に要する計算資源は、地球シミュレータを用いた場合、512CPU 並列条件下で 40 実時間程度であった。

Fig.1 Analysis model and the computational domain.

3. 渦構造の再現性

車両姿勢変化時に作用する非定常空気力は、車体周辺に発生する流れ構造と強いつながりがあると予想される。実際、定常走行時においても、セダン型車両の後方には二つの強い後引き渦が発生することが古くから知られているが、その他にもピラーやドアミラー等からも大小の渦が形成され、これらの渦が空力騒音に大きく関わることが知られている⁴⁾。そこで本節では、HPC-LES の非定常空力評価に対する基礎検証として、車両姿勢を固定した（静解析）状態での車両周りの渦構造の再現性について、風洞可視化実験との比較を行う。

Fig.2 に車両後方のウェーク構造を示す。図は、中央断面での総圧（実験については時間平均、LES について

は時間平均と瞬時)の空間分布を示している。尚、値については主流動圧により無次元化されている。LESによる瞬時分布を見てもわかるように、この領域は車体後端四面から剥離したせん断層、さらにはリアピラーから発生する後引き渦等が相互作用を及ぼすことで複雑な乱流場を形成している。この領域の予測精度は車体後端圧力分布、ひいては車両空力抵抗の予測精度に直結し、時間平均モデルによる再現が難しい領域として知られているが、LESは実験で得られたウェーク領域の形状を良好に再現していることがわかる。

Fig. 2 Wake structures behind the vehicle on XZ-section on the center line (total pressure distributions): Above, experiments; Center and below, LES.

Fig. 3に、車体側面の時間平均総圧分布を示す。ドアミラー後方A断面では、実験結果からドアミラーのウェークとAピラーにより形成された渦構造が顕著であるが、この二つの渦構造をLESは良好に再現している。フロントタイヤハウス後方のB断面では、タイヤハウスとタイヤにより形成されたウェークが顕著であり、このLESによる再現も良好である。さらに後方のC断面では、タイヤハウスのウェーク構造が実験結果に対してLESではやや過大評価しているようである。この点については数値スキームと格子解像度の両面からのさらなる検討が必要である。

Fig. 3 Flow structures on the side of the vehicle (total pressure distributions).

4. ヨー角変化に伴う非定常空気力と流れ構造

3節で解析を行った市販車両を対象に、車両ヨー角を動的に変化（急な横風やハンドル操作に対応）させた場合の非定常流体解析を行った。流入風に対する車両ヨー角を0度を設定し、流れ場を発達させた後、Fig.4 上図に示すように、0.05秒間に車両ヨー角を0度から5度に変化させ、5度に固定した状態で0.05秒間維持した後、0.05秒間で再び0度に戻す。Fig.4は、このとき車体中心軸に対して作用するローリング（x軸）およびヨーイング（z軸）モーメントを示している。尚、数値解析上の問題から、得られたモーメントの時系列データには非物理的な振動が見られるため（図中赤線）、1kHzでローパスフィルターをかけたデータについても示す（図中黒線）。ローリング、ヨーイングモーメント共に、ヨー角5度で固定した0.15秒～0.20秒に作用する値に対して、車体姿勢が動的に変化する0.1～0.15秒、0.2～0.25秒ではその数倍の大きな力が作用していることがわかり、この種の非定常空気力予測の重要性が伺われる。

Fig. 4 Time series of the rolling (above) and yawing (below) moments.

Fig.5にLESにより予測された、リアウインド上部に発生する渦構造の可視化図を示す。図は主流動圧で無次元化された瞬時総圧分布（ $T=0.1\text{sec}$, 0.15sec , 0.2sec , 0.25sec ）を示している。 $T=0.1\text{sec}$ のヨー角0度の結果から、瞬時構造はほぼ左右対称の分布をしており、リアウインド前縁部（上図）には、Aピラーから発生した1対の渦構造が、屋根部両端に現れているのがわかる。ヨー角が0度から5度に達した直後の $T=0.15\text{sec}$ と、5度で0.05秒固定した後の $T=0.2\text{sec}$ を比較すると（どちらもヨー角は5度）、どちらも著しい非対称性を示しているが、その程度に極端な差異は見られない。さらにヨー角が0度に回復した直後の $T=0.25\text{sec}$ では、流れ構造はほぼ左右対称となっている。このことから、車体上部の渦構造については、0.05秒程度の比較的速い姿勢変化に対しても、流れ構造の時間追従性は高いと言える。これに対して、車両下部の床下と地面の間の流れをFig.6に示す。LESにより再現された $T=0.1\text{sec}$ （ヨー角0度）の流れ構造と、ヨー角0度の定常風洞計測により得られた流れ構造の一致は良好であり、エンジンルームからの噴出しにより、二つのストリーク状の流れ構造が再現されている。ヨー角0度の $T=0.1\text{sec}$ では（エンジンルーム内や床下形状の非対称性により若干の流れ構造の非対称性は見られるが）、ストリークの流下方向は一樣流方向にほぼ一致している。また、ヨー角5度で0.05秒間固定した後の $T=0.2\text{sec}$ でも、ストリーク流下方向は一樣流方向とほぼ一致しており、結果、車体に対してはストリークはおおよそ5度斜め方向に向いている。これに対して0度から5度に達した直後の $T=0.15\text{sec}$ では、車体姿勢は5度になっているものの、ストリークの方法はまだ5度に達しておらず、車体中央断面に対して対称性を維持している。同様に、車体姿勢が0度に回復した $T=0.25\text{sec}$ において、ストリーク構造はまだ十分に回復しておらず、著しい非対称性を示している。このことから、車体下部の流れ構造については、姿勢変化に対する時間追従性が低いことが伺われる。以上の結果より、車体ヨー角変化時には、車体上部と下部では、車体姿勢変化に対する時間追従性に差異がみられ、結果、車体左右の圧力分布に、屋根と床下でアンバランスが発生し、Fig.4上図に見られた非定常的に大きなローリングモーメントが発生したと考えられる。

またここでは図示しないが（詳細は文献³⁾）、車体側面にも、車体姿勢変化時にはヨー角を5度に固定した場合と比較して流れの非対称性がより顕著となり、結果、定常状態と比較して大きな非定常空気力が作用することがわかった。尚、ヨーイングモーメントについては、Fig.4下図からわかるとおり、ヨー角加速度の正負に応じて大きく値が変化しており、これは加速度運動による付加質量の効果であると考えられる。

Fig. 5 Snapshots of the total pressure distributions over the rear window above the forward and rear edge during the dynamic yaw-angle change (visualized from upstream).

Fig. 6 Snapshots of the total pressure distributions under the body during the dynamic yaw-angle change.

5. 結論

次世代車両空力評価システムとして期待される HPC-LES 技術を用いて、一様流中で車両ヨー角を動的に変化させた場合の非定常流れ場解析を行い、車両周りの流れ場を可視化することで、非定常空力発生メカニズムの解明を試みた。

まず車両姿勢を固定した静的解析を実施し、車両周辺に発生する渦構造を風洞実験データと比較することで、手法の精度検証を行った。LES により再現された流れ場は、概ね実験データを再現しており、流れ構造解析における LES の有効性が示された。特に車体後方では、車両周りで発生した様々な渦やせん断層が相互作用を及ぼしあい、複雑な乱流状態となることから、非定常渦構造を直接解析できる LES の有用性が伺われる。

ヨー角変化による動的解析から、本研究で想定した運動条件下では、姿勢変化時には静的状態と比較して数倍のヨーイング、およびローリングモーメントが車体に作用することが示され、この種の非定常空気を評価することの重要性が示された。瞬時流れ構造の可視化から、特に非定常ローリングモーメントの発生要因として、車両屋根部と床下部の流れ構造の時間応答性の差異が影響していることが示唆され、HPC-LES 解析が非定常流体力発生機構の解明に大きなツールとなりうることを示された。

ただし、今回の静解析による精度検証は主要渦構造の再現という定性的な評価に留まっている。また動的解析では得られた流体力に数値的不安定性に起因する非物理的な振動も確認された。今後、流れ構造の空間スケールや流体力等のより定量的な比較検証を行い、乱流モデル、数値スキーム、格子作成を統合的に評価することで、手法の高精度化と実用化を図る必要がある。

いずれにしてもさらなる低燃費化の要求とそれに伴う車両軽量化の動きにより、車両設計における空力性能の向上はより重要な課題になると考えられ、HPC-LES による流れ可視化解析が新たな空力評価システムとして期待される。

謝辞

本研究で開発を進めている解析プログラムは、文部科学省次世代 IT プロジェクト「革新的ソフトウェアの研究開発 (RSS21)」の一環として開発された FrontFlow/red を基盤としている。本研究は上記 RSS21 プロジェクト、および平成 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、地球シミュレータ共同利用プロジェクトの一環として独立行政法人海洋研究開発機構の地球シミュレータ、および北海道大学・情報基盤センタのスーパーコンピュータ SR11000/K1 を利用した。特に解析モデルの作成と計算の実施にあたってはアドバンスソフトの大西慶治氏と堀

高太郎氏にご協力頂いた。また、鬼頭幸三技術事務所の鬼頭幸三氏、および自動車技術研究所の小林敏雄教授には、空力設計への実用化の観点から様々な助言を頂いた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 文科省次世代 IT プログラム「革新的シミュレーションソフトウェアの研究開発」：
<http://www.ciss.iis.u-tokyo.ac.jp/rss21/>.
- 2) Tsubokura, M. et al.: Large Eddy Simulation of Unsteady Flow around a Formula Car on Earth Simulator", SAE 2007 Transactions Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 2007-01-0106 (2007)
- 3) Tsubokura, M. et al.: Computational Visualization of Unsteady Flow around Vehicles Using High Performance Computing, Computers & Fluids, accepted to be published (2008).
- 4) Li, Y. et al.: Evaluation of Wind Noise Sources Using Experimental and Computational Methods, SAE Paper, 2006-01-0343 (2006).