

大規模 LES 流体解析による自動車非定常空力予測と性能向上に関する実証解析

課題責任者

坪倉 誠 神戸大学 大学院システム情報学研究科

著者

坪倉 誠 神戸大学 大学院システム情報学研究科

本研究では、我々が開発した次世代空力シミュレーションシステムの産業界での普及・促進を目指して、自動車周りの空気流れ構造の解明による空気抵抗・高速走行安定性の両面の最適化手法を構築することを目的としている。本稿では、実車詳細形状を再現した大規模 LES により、車体周りの特徴的な流れ構造と非定常挙動を厳密に再現し、流れが車体を与える空気力の非定常特性に着目してそのメカニズム解明を試みた実例として、タイヤ肩部の局所的かつ微細な形状変化が車両全体の空力性能に及ぼす影響について着目した解析と、揚力の非定常特性に着目した解析の結果を示す。いずれも要素数が大きく、長時間の解析を必要としたケースであり、高速・高性能なスーパーコンピュータによる大規模な解析が求められた。今回得られた結果から、大規模並列計算の高速処理が可能である地球シミュレータを用いた数値計算は、今後世界をリードする自動車空力性能の最適化手法を提案するうえで多大な影響力を持つものと言える。さらに産学連携で本課題を進めることにより、我が国の基幹産業である自動車産業の国際競争力強化に大きく貢献することが出来ると期待される。

キーワード：大規模 LES, 自動車非定常空力解析

1. 背景

自動車開発において、燃費向上のための空気抵抗低減は商品力の向上、社会的な要請の両面から、各自動車メーカーに課された重要な課題となっている。近年、空気抵抗低減のための研究の中で、横風や車両運動に伴う流れ構造の変化によって空気抵抗が変化し、運動性能や走行安定性にも影響を及ぼしている可能性が指摘されている。このような現象のメカニズム解明による抵抗低減・走行安定技術の向上が期待されるが、従来の実験的計測手法では詳細な流れ構造の把握が困難であった。数値解析による詳細な流れ構造の把握は、メカニズム解明に有用と思われる一方、実車の詳細形状を再現した数十億要素規模の大規模数値解析は各自動車メーカー所有のスーパーコンピュータではいまだ実現困難となっている。そこで、本研究では自動車まわり空気流れの最適化手法構築を目的とし、自動車の詳細形状と実走行環境を再現した大規模 Large-Eddy Simulation (LES) を行う。これにより、車体周りの特徴的な流れ構造とその非定常挙動を再現することで、自動車に作用する非定常空力特性に着目してメカニズム解明を目指す。特に、地球シミュレータを用いた解析では、自動車メーカー所有のスーパーコンピュータで実行可能な計算規模を想定し、産業界への普及を図るための実証解析を行う。

2. 解析手法

本研究では非圧縮性流体を仮定し、節点中心有限体積法により離散化した Navier-Stokes 方程式を解いている。乱流モデルとして LES を採用し、サブグリッドスケール

の乱流モデルとして Smagorinsky による渦粘性型モデルを用いている。モデル定数 C_s は 0.15 とし、壁面近傍では van-Driest 型のダンピング関数を用いて、渦粘性を減衰させている。また、壁面では計算コストの面から、境界層の解像に十分な格子を配置できないため、速度境界条件として Spalding-law に基づく壁法則を適用し、壁面摩擦を境界条件として与えている。

解析領域は非構造格子によって離散化した。解析スキームとして、空間離散化には 2 次精度中心差分法を用い、対流項については中心差分に 1 次もしくは 3 次精度の風上差分をブレンドすることで、非構造格子の非直交性に起因する数値振動の抑制を図っている。時間積分法としては Euler 陰解法を用いている。速度と圧力のカップリングには SMAC 法を採用し、圧力ポアソン方程式の解法には ICCG 法を、その他行列解法には BiCGSTAB 法を用いている。

解析コードとしてはオープンソースソフトウェア FrontFlow/red を大規模自動車空力解析用に最適化した FrontFlow/red-Aero-HPC を用いた。なお、地球シミュレータで計測した並列化率は 99.6%、ベクトル化率は 95.6% である。

3. タイヤ詳細形状解析

本解析では、空気抵抗低減を目的とし、タイヤの接地箇所近傍におけるたわみ変形が自動車周りの流れ場を与える影響を LES により予測した。タイヤを含めた自動車足周り部分が車両全体の空力特性に与える影響は大きく、近年それらの最適化による空気抵抗低減への取り組みが

注目を浴びている^[1]。しかしながら走行中の自動車は、タイヤの回転影響や自動車とは相対的に移動する床面の影響により足周りに複雑な流れ場を形成しており、最適化には大規模な数値シミュレーションによる詳細な解析が必要とされた。

エンジンルームや床下機器形状といった詳細形状が再現された詳細自動車モデル(図1)を解析対象とし、たわみ変形の有無のみが異なる2種のタイヤを搭載した場合に、定常空気力にどのような差異が生じるか調べた。詳細な形状再現性が求められるタイヤは、水平方向解像度を1.5mm~4mm程度、垂直方向解像度を0.5mmに設定し、車両においては表面解像度を4mm~16mm程度とし、総要素数は5500万要素程度となった。車速は100km/hを想定し、直進状態での解析を行った。

図2に、左フロントタイヤ近傍の総圧分布を示す。たわみ変形の有無によってタイヤ表面からの剥離位置が異なり、それに伴い圧力欠損の差が生じている様子が見られる。また、フロントタイヤ近傍の流れ性状の違いは車両床下の流量や流線分布にも影響が及んでいることも確認できた。車両全体にかかる空気抵抗係数値は、たわみ変形がつくことでおよそ8.6%上昇したことから、微細な形状の再現性が、空気抵抗予測精度に大きく影響することが明らかになった。

4. セダン形状車体の揚力変動解析

本解析では、揚力の時間的な変動に着目した計算を行い、動的な流れ構造を抽出するポスト処理に関する研究を行った。揚力の時間変動に影響を与える非定常な流れ構造を抽出し、更にその発生個所を特定し、特にサスペンションの共振につながる流れ構造を取り除くことは、自動車の乗り心地改善につながる。自動車床下流れの低周波振動を捉えるために、大規模かつ長時間の数値シミュレーションが必要となり、高性能・高速なスーパーコンピュータでの解析が求められた。

自動車のサスペンション系の固有周波数1~2Hzに近く、共振を生じる可能性がある比較的低周波の揚力変動と、その原因となる流れ構造を、固有直交分解(POD)や動的モード分解(DMD)によって抽出することを試みた。低周波変動の現象を捉えるため、従来の定常空力予測に要する実時間の10倍以上である20秒間の解析を実施した。なお、汎用的なPCクラスタを用いて同様の計算を実行すると1500時間程度要するのに対し、地球シミュレータを用いた際は同じCPU数でも500時間程度で計算が終了した。

解析対象は、エンジンルームや床下機器形状といった詳細形状を再現したセダン型車両(図3)である。解析対象の表面解像度は4mm~20mm程度とし総要素数は4,500万要素程度である。車速は140km/hを想定し、直進状態で

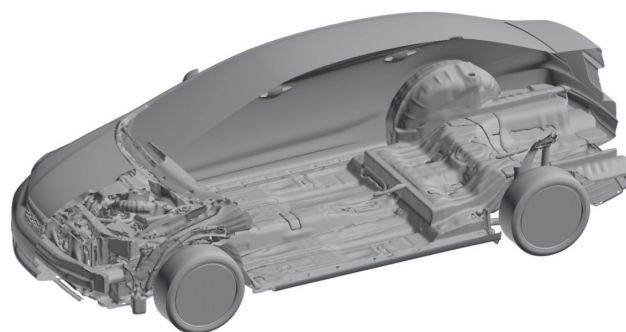


図1 解析対象。

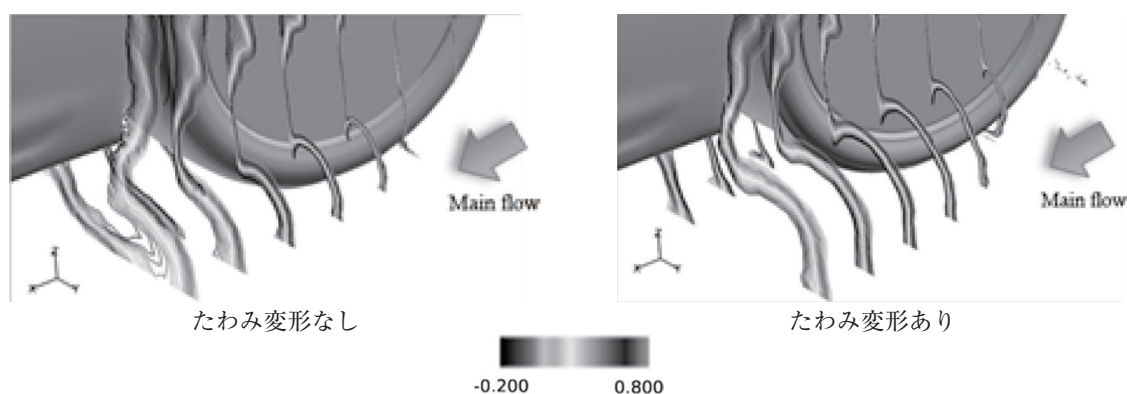


図2 フロントタイヤ近傍総圧分布。

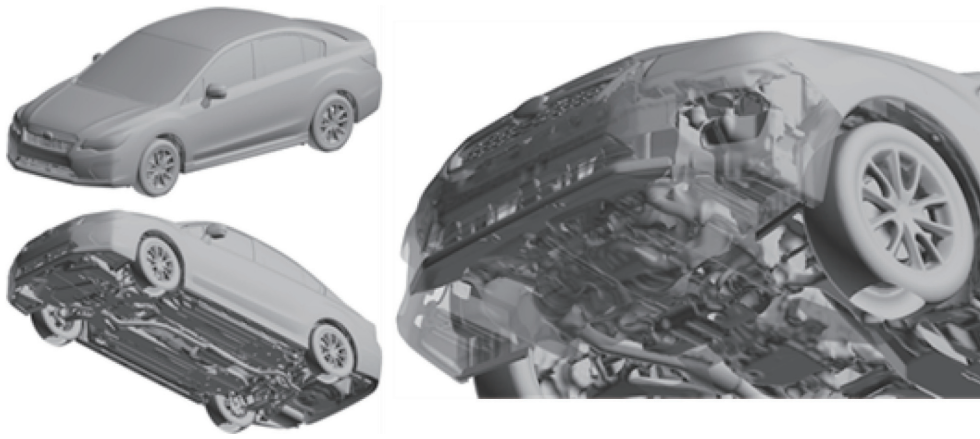


図3 解析対象。

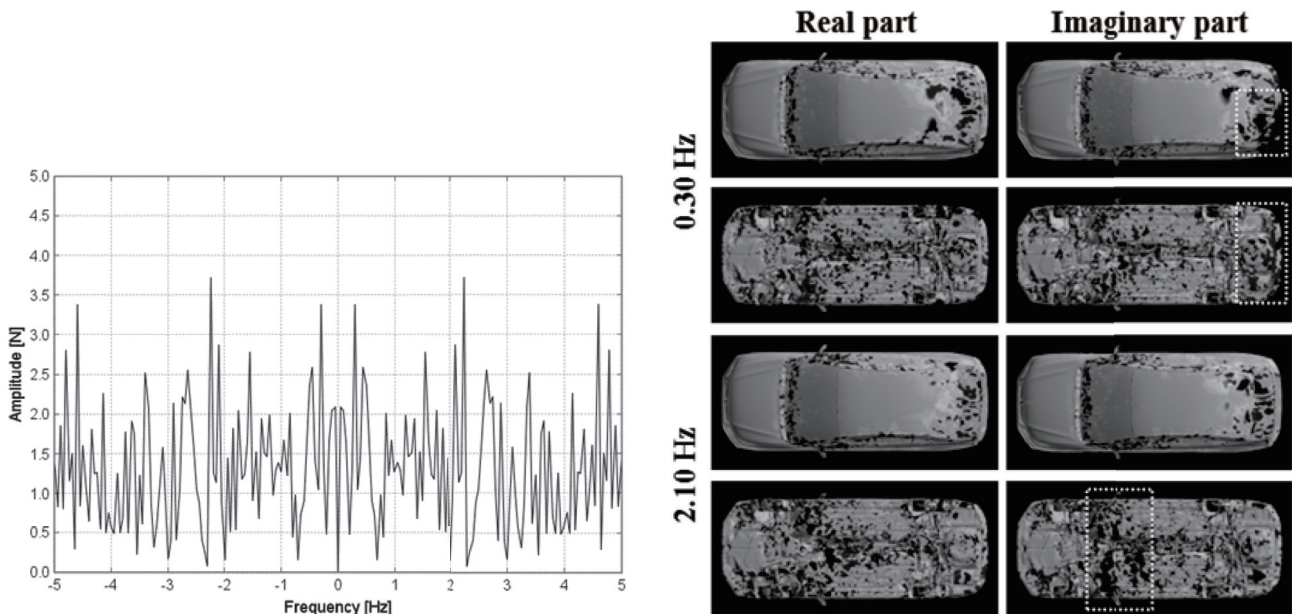


図4 揚力の振幅スペクトル。

図5 0.3Hzおよび2.1Hzのモード分布。

の解析を行った。まず、図4に20秒間の揚力の時間変化に対して、FFTを適用した結果を示す。0.3Hzや2Hz近傍にピークが見られる。続いて、解析領域内全節点の圧力に対して、DMD解析を適用し、FFTでピーク生じた周波数に対応するモード分布を可視化することで、揚力変動の発生箇所を検討した(図5)。結果として、床下中央部にモード振幅が大きな領域が見られ、床下流れが揚力の低周波変動に寄与していることを特定した。なお、本研究は富士重工業株式会社との共同研究として行われた。

謝辞

本研究は科研費基盤研究(B) No. 26289033の一部として行われた。また、解析ソフトウェアの開発は文部科学省「HPCI戦略プログラム」分野4次世代ものづくりの支援によって行われた。ここに記して謝意を表す。

文献

- [1] 農沢隆秀, 岡田義浩, 大平洋樹, 岡本哲, 中村貴樹, “自動車の空気抵抗を増大させる車体周りの流れ構造” 日本機械学会論文集B編 75(757), 1807-1813, 2009年9月.

Prediction of Unsteady Vehicle Aerodynamics Characteristics and Substantial Analysis for Improvement of Aerodynamics Performance by Large Eddy Simulation

Project Representative

Makoto Tsubokura Graduate School of System Informatics, Kobe University

Author

Makoto Tsubokura Graduate School of System Informatics, Kobe University

The main purpose of this research was developing an optimization method for both the aerodynamic drag and stability during high speed operation, by clarifying the flow field around vehicles. In this paper, two examples are described, which are specifically focused on reconstructing typical flow fields around vehicles and unsteady behavior by using detailed models of real vehicle in large scale LES. Both of them had large elements and required many calculation steps, so a high performance supercomputer was needed to reconstruct the flow field in high accuracy. From the results which were obtained in this study, we can say that the numerical simulations which were conducted on the Earth Simulator have a great influence in suggesting the vehicle aerodynamic optimization method which will lead the world.

Keywords: large scale LES, vehicle unsteady aerodynamics analysis

1. Background

Aerodynamic development of road vehicles for improvement of the fuel efficiency is one of the most important characteristics. Recently studies about reducing the aerodynamic drag indicated that the cross wind or change of flow structures that arise from vehicle motion might change the aerodynamic drag, and influence the dynamic performance or the running stability. In this study, the detailed vehicle geometry was reconstructed and the real running condition was reproduced in order to develop an aerodynamic optimization method for the flow field around vehicles. Under these conditions, several large scale LES, were conducted and the unsteady aerodynamic performance was focused on.

2. Numerical method

The governing equations of LES are given by discretized by vertex-centered finite volume method for an incompressible

Newtonian fluid. SGS eddy viscosity is used which was modeled by Smagorinsky with constant C_s set to 0.15, and the wall damping function to express the asymptotic behavior of an SGS eddy viscosity near the wall, which was created by van-Driest.

3. Detailed tyre geometry simulation

In this case, LES were conducted to estimate the influence of tyre deformation near the ground on the flow field around the vehicle. In this simulation a detailed vehicle model (Fig. 1) was used, and the flow field differences of the two types of tyres, a non-deformed tyre and a deformed tyre, were investigated. There were flow separation point differences on the front tyre surface near the ground region, and total pressure distribution differences were also observed (Fig. 2). These flow characteristics near the front tyre influenced downstream flow, such as the flow volume under the vehicle or the flow stream line distributions, and the

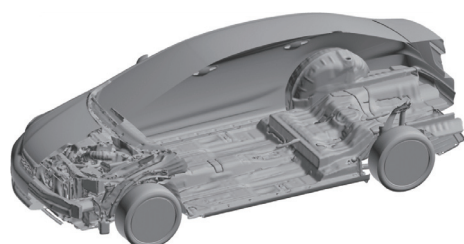


Fig. 1 Vehicle model.

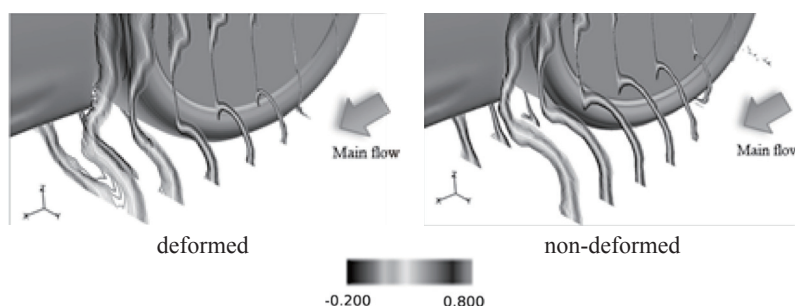


Fig. 2 Total pressure distribution near the front tyre.

aerodynamic drag was increased by 8.6 % because of the tyre deformation. The minute geometric reproducibility of the model made a big difference in aerodynamic force estimation.

4. Lift force fluctuation simulation of a sedan type vehicle

In this case, time fluctuation of the lift force was focused on, and a post-processing method which extracts the dynamic flow structures was developed. In order to extract relatively low frequency lift fluctuations which can activate the resonance of the vehicle suspension system, and to specify the flow structure which induces the fluctuation, POD or DMD were applied to the simulation results. A simulation lasting more than 10 times longer (physical time) was conducted to comprehend the low frequency fluctuation. A detailed sedan type vehicle model (Fig. 3) was used for this simulation. There are peaks near in 0.3 Hz or 2 Hz in Fig. 4, a result which was obtained from FFT which was applied to the time fluctuation of the lift force. Then, DMD was applied to pressure, which is a physical quantity of all nodes in the calculation region, and the mode distributions which were corresponding to the peaks in FFT result in order to examine the source of the lift fluctuation were visualized (Fig. 5). There is a region where the mode vibration amplitude was large, and the underfloor flow was specified to influence the low frequency fluctuation of the lift force.



Fig. 3 Vehicle model.

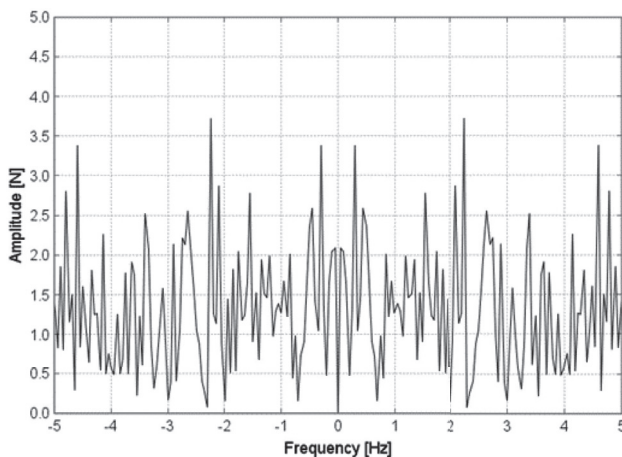


Fig. 4 Amplitude spectrum of the lift force.

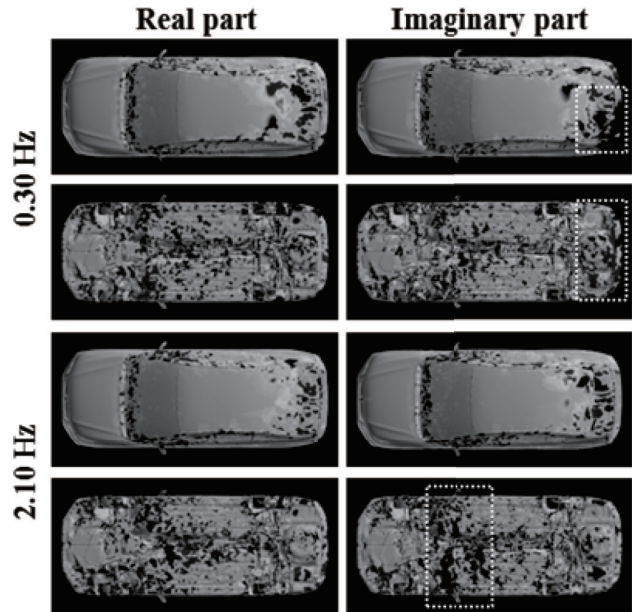


Fig. 5 Mode distributions in 0.3 Hz, 2.1 Hz.

Acknowledgement

This work was supported by the following grants: “Strategic Programs for Innovative Research” Field No. 4: Industrial Innovations from the Ministry of Education, Culture, Sports, Science, and Technology’s (MEXT) “Development and Use of Advanced, High-Performance, General-Purpose Supercomputers Project” and was carried out in partnership with the University of Tokyo to improve FrontFlow/red-Aero for a high performance computing simulation carried out using “Revolutionary Simulation Software (RSS21)” by MEXT for developing FrontFlow/red, and it was supported by the Industrial Technology Research Grant Program (2007–2011) from the New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) for developing the simulation software “FrontFlow/red-Aero” and by the Japan Society for the Promotion of Science (JSPS) Grant-in Aid for Scientific Research (KAKENHI) (B) No. 26289033 for the physical mechanism of unsteady aerodynamics.

