

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
理化学研究所 計算科学研究機構

著者

池田 隼^{*1}, 中野 樹^{*1}, 中島 卓司^{*2}, 坪倉 誠^{*1,3}

*1 神戸大学 大学院システム情報学研究科, *2 広島大学 大学院工学研究科, *3 理化学研究所 計算科学研究機構

本課題では、自動車を対象とし、空気抵抗低減と運動性能や走行安全性を両立するための流れ最適化手法の構築を最終目的として、大規模 LES (Large Eddy Simulation) を行ってきた。本年度は、実車を精緻に再現した詳細形状モデルを対象として、サスペンション系の固有振動数に近く操縦安定性に影響が大きいと考えられる 1~2Hz の低周波揚力変動を捉えるための数 10 秒オーダーの長時間空力変動解析や、簡略化形状モデルを対象として、流れ場の最適化を実現するための能動的流れ制御手法であるプラズマアクチュエータに着目した実証解析を進めた。本報告では、プラズマアクチュエータを活用することで自動車周りの縦渦を制御し、空気抵抗低減を試みた解析結果について報告する。

キーワード：自動車空力, 抵抗低減, 非定常流体解析, 能動的流れ制御, プラズマアクチュエータ

1. 序論

自動車の設計開発において、燃費向上のための空気抵抗低減は、商品力の向上と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。一方で、自動車のエクステリア形状にはデザイン性も強く要求される。一般的に、抵抗低減を狙った形状とデザインの自由度は背反関係にある。例えばデザインの観点から、車体の後端部に曲率を持たせた形状が望まれたとする。しかしながら、このような形状では流れの側面から背面への回り込みや、縦渦発生によって表面圧力が低下することから、空気抵抗が増大する。もし、車体形状を変更させることなく流れ構造を制御することができれば、デザイン性と空力性能の両立が期待できる。近年では、このような流れ制御を目的とするデバイスの一つとして、誘電体バリア放電プラズマアクチュエータ (Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator : DBDPA) が注目されている。DBDPA は、誘電体を 2 つの電極で挟んだ構造になっており、高周波・高電圧の交流を印加することで周囲にプラズマが形成され、流れが誘起される。本研究では、非定常乱流解析において、DBDPA の効果を体積力分布としてモデル化することで再現し、流れ構造の制御を試みた。解析対象は自動車簡略化形状モデルとし、車両後方に形成される縦渦の制御による空気抵抗低減を目指し、DBDPA 設置位置や制御パラメータについて検討した。

2. 解析手法

2.1 流体解析手法

解析コードには、非構造格子有限体積法をベースとしたオープンソースの非定常乱流解析ソフトウェア FrontFlow/red を基に、HPC (High Performance Computing)

環境において大規模自動車空力解析を実現するために改良を施した、FFR-HPC を用いた。自動車模型周りの剥離渦、縦渦の生成を再現するため、乱流モデルには LES を用いて解析を行った。LES の基礎方程式は、空間フィルタを施した非圧縮性 Navier-Stokes 方程式である。なお、SGS (sub grid scale) モデルとしては、Lilly による最小二乗法を用いたダイナミック SGS モデル [1] を用いた。

DBDPA の効果は Suzen らによって提案された体積力分布モデル [2] に基づき、基礎方程式に外力項を付加することで再現した。

2.2 解析対象モデルと解析領域、解析格子

解析対象には、セダン型乗用車を基にした 1/5 スケールの簡略化形状モデルを用いた (図 1)。フロントウィンドウ両端の A ピラーと、リアウィンドウ両端の C ピラー、そしてトランクデッキが再現され、これらによってセダン型車両まわりの代表的な渦構造が再現されるモデルとなっている。なお、全長は 0.84m、全幅 0.32m、全高は 0.268m である。

解析領域は矩形断面の直方体で、長さ方向に 13.2m、幅方向に 3.2m、高さ方向に 3m と十分な流路断面積をもたせることで、ブロック効果によって空力係数に影響が出ることを防いだ (図 2)。入口では、一様に流速

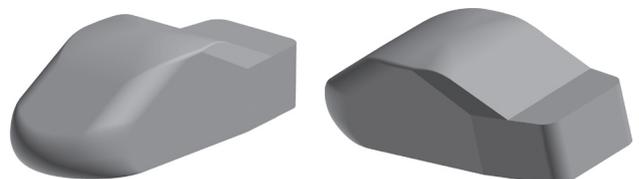


図 1 簡略化形状モデル

19.8m/s を与え、側壁や上面、地面は自由滑り条件とした。出口は速度勾配が0になるように設定し、大気圧を規定している。車体表面には Spalding-law に基づく対数則条件とし、壁面せん断応力を境界条件として与えた。

車体表面の格子は三角形格子とし、表面には境界層解像のためのプリズム層を17層挿入した。壁面第一格子点までの幅は0.05mmで、このときの無次元壁面距離 y^+ は概ね1以下に収まっている(図3)。

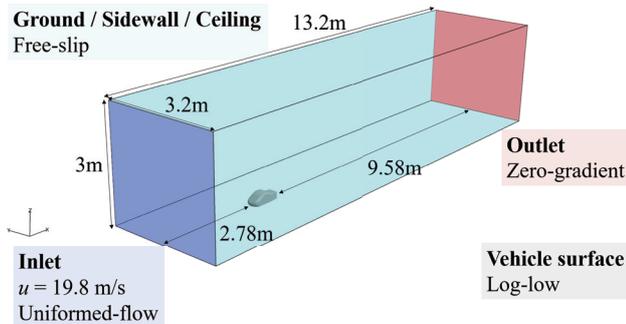


図2 解析領域と境界条件

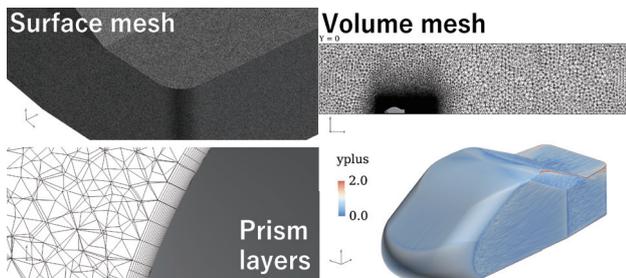


図3 解析格子

2.3 計算条件と計算コスト

空間の離散化には2次精度中心差分法を用いた。ただし対流項には、2次精度中心差分95%と1次精度風上差分5%をブレンドしたスキームを用いて、数値振動を抑制した。時間積分法には1次精度のEuler陰解法を用いた。流体は大気を想定し、密度は $1.2\text{kg}/\text{m}^3$ 、粘性係数は $1.82 \times 10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$ とした。

128ノード512コアを用いたMPI並列計算を行い、1ケースあたりの計算時間は150~200時間程度であった。なお、本研究ではDBDPAの設置位置やパラメータを変えた十数ケースを同時並行的に実施した。

3. 解析結果

3.1 流れ構造制御個所の検討

DBDPAを再現した解析に先立ち、制御対象とする空気抵抗を発生させる流れ構造を調べるため、制御をおこなわない計算を行った。その結果、図4に示すようにCピラーから生じる縦渦の影響でトランクデッキ端に発生する縦渦(以下、トランクデッキ端渦)が、車体側面から背面にかけて負圧領域を形成することで、空気抵抗を生じていることが分かった。したがって、トランクデッキ端渦の影響を弱めることで、空気抵抗の低減が可能であると推察した。本研究ではトランクデッキ側面にDBDPAを設置し、上向きに流れを誘起させることで、渦の位置を持ち上げ、車体から離すことで負圧領域を減らし、空気抵抗低減を狙った。

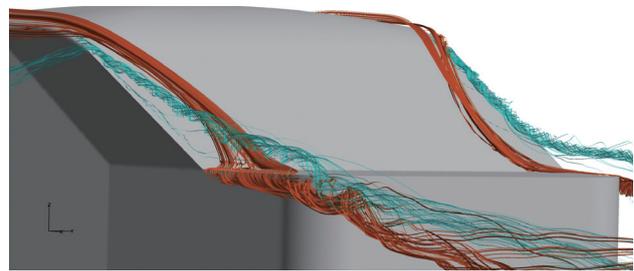


図4 Cピラーから生じる縦渦(緑)と空気抵抗の要因となる縦渦(赤)

3.2 DBDPAを再現した解析と出力の最適化

DBDPAの出力を、無風状態で4m/s、15m/s、25m/sの誘起流速が発生する3条件として解析を行い、制御を行わない解析と比較した。各ケースのDBDPA出力と空気抵抗係数 C_D を表1に示す。DBDPAにより、最大で0.004の C_D 値低減効果が得られた。

続いて、空気抵抗の要因となるトランクデッキ端渦周辺の渦度絶対値分布および、車体表面圧力係数分布を可視化した(図5)。空気抵抗低減効果が得られたケースでは、渦は強まっている傾向にあるものの、位置が上方に移動している。そして、渦の位置が移動することで、トランクデッキ端の負圧領域が縮小している様子がわかる。この結果から、DBDPAを用いた流れ構造の制御によって、空気抵抗低減効果が得られることが実証できた。

表1 DBDPA出力と空気抵抗係数 C_D

	w/o PA	Case 1	Case 2	Case 3
無風時誘起流速 [m/s]	0.0	4.0	15.0	25.0
C_D	0.144	0.143	0.140	0.141

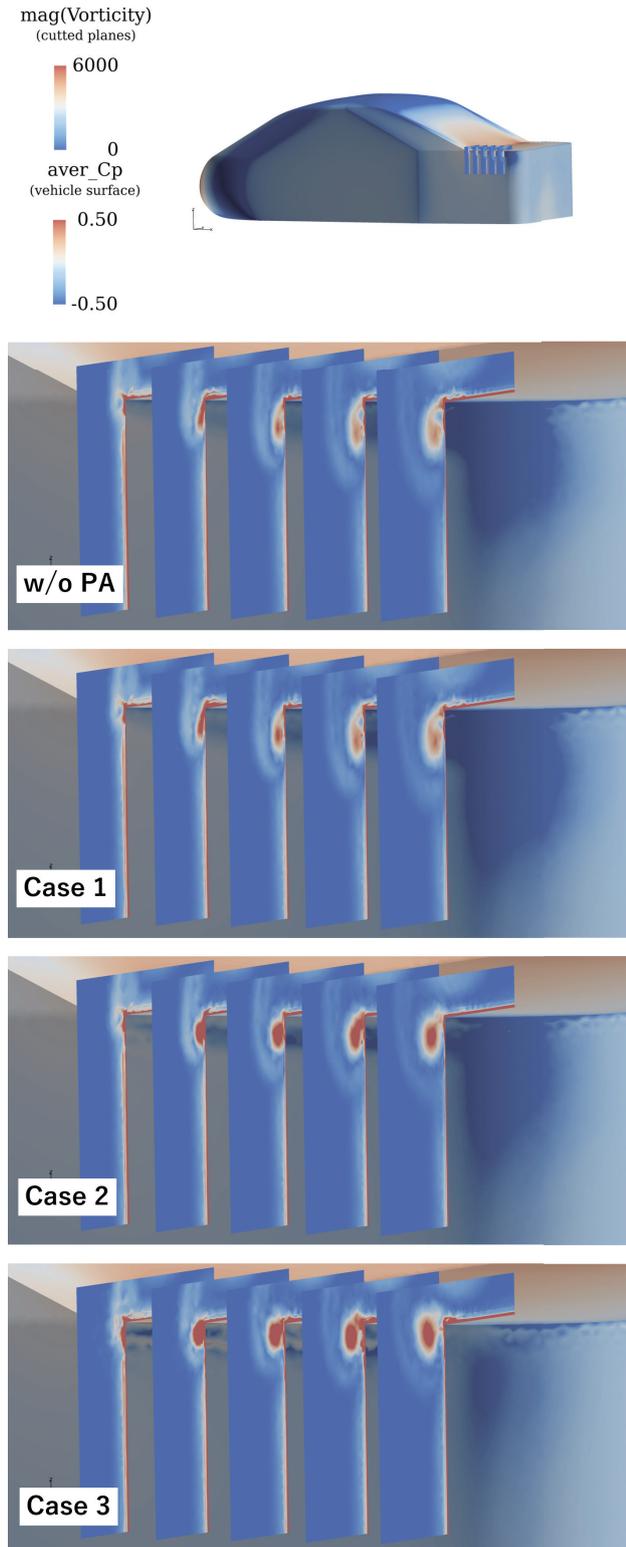


図5 トランクデッキ端渦の渦度絶対値と表面圧力係数分布

4. 結論

本研究では、自動車空力性能を向上させるため、DBDPAによる能動的流れ制御を適用した非定常乱流解析を行った。簡略化したセダン型車両周りの流れ構造のうち、トランクデッキ端に生じる縦渦を車体から遠ざけ、車体表面の圧力低下を抑制することで、空気抵抗低減効果が得られることが示された。今後は、複数箇所に設置したDBDPAを同時に作動させたり、位置・出力の最適化によって、空気抵抗低減効果の最大化、より詳細な実車形状を対象とした流れ制御を検討している。

謝辞

本研究は、マツダ株式会社、九州大学、神戸大学、東京理科大学、広島大学との共同研究として行われた。ここに記して謝意を表する。

文献

- [1] D. K. Lilly, “A proposed modification of the Germano subgrid - scale closure method,” *Physics of Fluids A*, vol.4, no.4, pp. 633-635, 1992.
- [2] Suzen, Yildirim, and George Huang, “Simulations of flow separation control using plasma actuators,” *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2006.

Unsteady Aerodynamics Simulation and Feasible Simulation on Performance Improvement of Road Vehicles Using HPC-LES

Project Representative

Makoto Tsubokura Graduate School of System Informatics, Kobe University
RIKEN Advanced Institute for Computational Science

Authors

Jun Ikeda^{*1}, Tatsuki Nakano^{*1}, Takuji Nakashima^{*2} and Makoto Tsubokura^{*1, 3}

*1 Graduate School of System Informatics, Kobe University, *2 Graduate School of Engineering, Hiroshima University, *3 RIKEN Advanced Institute for Computational Science

In this research project, Large Eddy Simulations for the road vehicle aerodynamics were conducted to develop the optimization method that achieve both the drag reduction and the running stability. This fiscal year, two research topics were tackled. One was the long duration simulations to investigate one to two Hertz fluctuations of aerodynamics that may affect the drivability because its frequency range is close to the natural frequency of vehicle mechanical system. The other was the simulations of the simplified vehicle using the active flow control device to optimize the flow structures around the vehicle. The results of the simulations for reducing the aerodynamic drag acting on the simplified vehicle by controlling the longitudinal vortex using the dielectric barrier discharge plasma actuator is shown in this report.

Keywords: Vehicle Aerodynamics, Drag Reduction, Unsteady CFD, Active Flow Control, Plasma Actuator

1. Introduction

In the development process of road vehicle, drag reduction for the improving fuel efficiency is the most important task for the vehicle manufacturers from both aspects of the product appeal and the social demand. On the other hand, the design property is also important on the vehicle external geometry. Generally, external geometry aimed at drag reduction and the degree of freedom of design property conflicts each other. If flow structures could be controlled without changing vehicle geometry, design property and aerodynamic performance can stand side by side. Recently, for the purpose of flow control, DBDPA (Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator) is gathering attention. In this study, we investigated the position and the parameters of DBDPA to control the longitudinal vortex generated around the simplified road vehicle model.

2. Numerical Methods

2.1. Computational code and DBDPA model

“FFR-HPC”, which is based on the unstructured finite volume method, was used as the computational code. This code is based on the open source CFD code “FrontFlow/red” and optimized to the vehicle aerodynamics simulation on HPC environment. In order to reproduce the unsteady flow structures around the vehicle, the Large-Eddy Simulation was used as the turbulence model. The governing equation was incompressible Navier-Stokes equation with the spatial filter. Dynamic SGS

model proposed by Lilly[1] was used as the the turbulent viscosity model. Sugen model[2] was used as the model of the DBDPA. In this model, the effect of the DBDPA was modeled as distribution of body force and the external force term was added to the governing equation.

2.2. Geometry, Numerical Domain, and Computational Meshes

The target model was the 1/5 scale model of the simplified sedan type vehicle. The rectangular parallelepiped was used for the computational domain. Uniform velocity of 19.8 m/s was imposed on the inlet boundary. For the outlet boundary, the pressure was fixed and velocity gradient was set to zero. Free slip boundary condition was applied to the side, top and ground. The logarithmic velocity profile was assumed on the vehicle surface, and surface friction was imposed as the boundary condition. The surface of the vehicle was reproduced by triangular meshes. The numerical domain was filled with tetrahedral elements. For the vehicle surface, the 17 layers of prism cells were inserted to capture the velocity profile of boundary layer.

2.3. Numerical Conditions and Computational costs

The second order central differencing scheme was adopted to spatial discretization. However, for the convective term, 5% first order upwind differencing scheme was blended to the

95% second order differencing scheme to eliminate numerical oscillation. For the time integration method, first order Euler implicit method was applied. The physical condition was based on the atmosphere; therefore, the density was 1.2 kg/m^3 and the kinematic viscosity was $1.82 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

128 nodes (512 cores) were used for each simulation using flat MPI parallelization and each simulation required 150 to 200 hours. In this study, several cases with changing parameters and position of DBDPA were carried out concurrently.

3. Results

3.1. Position of Plasma Actuators

Prior to the simulations with the active flow control, the simulation without the active flow control was carried out in order to investigate the flow structures that cause the aerodynamic drag to be controlled. The result indicated that the negative pressure region on the side of the trunk-deck due to the longitudinal vortex contributed the aerodynamic drag. This longitudinal vortex was originated from the influence of the C-pillar vortex. Then, we decided to reduce the negative pressure region by eliminating the influence the effect of the longitudinal vortex. Thereby, DBDPA was installed on the side of the trunk-deck, and the flow was induced upward to lift the position of the longitudinal vortex.

3.2. Optimization of the parameter of DBDPA

Simulation with flow control using DBDPA under three conditions were conducted and the results were compared with that of the case without the flow control. The power of three conditions were set to generate induced flow velocities of 4 m/s, 15 m/s, and 25 m/s in a windless condition. The drag reduction effect of 0.004 at the maximum was obtained using DBDPA. The parameters of DBDPA and the results are shown in Table 1.

Table 1 Parameters of DBDPA and drag coefficient C_D

	w/o PA	Case 1	Case 2	Case 3
Induced flow velocity [m/s]	0.0	4.0	15.0	25.0
C_D	0.144	0.143	0.140	0.141

Next, the vorticity magnitude distributions and the surface pressure distributions around the vortex at the side of the trunk-deck were visualized. In the case which the effect of the drag reduction was observed, although the vortex tended to be strengthened, the position of the vortex moved upward. Then, the negative pressure around the trunk-deck was shrank as the position of the vortex moved.

From these results, it was demonstrated that the drag reduction effect can be obtained by controlling the flow structures using DBDPA.

4. Conclusions

In this research, the unsteady aerodynamics simulations using active flow control by DBDPA were performed in order to improve the aerodynamic performance of the road vehicle. It was shown that the drag reduction effect can be obtained by keeping the longitudinal vortex generated at the side of the trunk-deck away from the vehicle and suppressing the pressure drop on the surface of the vehicle.

References

- [1] D. K. Lilly, "A proposed modification of the Germano subgrid-scale closure method," *Physics of Fluids A*, vol.4, no.4, pp. 633-635, 1992.
- [2] Suzen, Yildirim, and George Huang, "Simulations of flow separation control using plasma actuators," *44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 2006.

