

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2014～2016

課題番号：26289033

研究課題名（和文）非定常空力特性に着目した実用ブラフボディの戦略的空力性能向上に関する実証的研究

研究課題名（英文）An Empirical Study on the Strategic Improvement of Aerodynamic Performance for Practical Bluff Bodies Based on the Unsteady Aerodynamics

研究代表者

坪倉 誠 (Tsubokura, Makoto)

神戸大学・その他の研究科・教授

研究者番号：40313366

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,700,000円

研究成果の概要（和文）：自動車を想定した実用ブラフボディを対象に、表面複雑形状を忠実に再現した超大規模LES空力解析を実施し、車体表面からの境界層剥離とそれにより発生する車体周りの様々な後引き渦の非定常相互作用を解明した。流体解析には非構造有限体積法と自動車六軸自由運動、さらにはドライバーモデルを組み込んだ連成解析手法を採用した。解析結果に対して、モード分解法を適用することで主要渦の不安定モードを解析し、車両運動との相互作用を解明した。得られた知見をもとに車体の空力抵抗削減と操縦安定性・横風安定性を両立するための戦略的流れ最適化手法を提案した。

研究成果の概要（英文）：Massively parallel Large-Eddy Simulation of flow around road vehicles were conducted considering their complicated geometry and interaction among various trailing vortices generated as a result of the boundary layer separation on the vehicle's surface were investigated, with its focus on their unsteady feature. Fully unstructured finite volume method coupled with vehicle's 6DoF motion and driver's reaction model were developed and utilized for the study. Mode decomposition methods like POD or DMD were applied to the transient numerical results and dominant instability modes of various trailing vortices and their relationship with vehicle's dynamic motion were revealed. Based on the obtained knowledge, strategic flow optimization method to realize both reduction of aerodynamic drag and improvement of high-speed stability or cross-wind safety was proposed.

研究分野：流体力学

キーワード：流体力学 空気力学 車両空力 数値解析 ラージエディシミュレーション シミュレーション工学  
自動車工学

### 1. 研究開始当初の背景

毎年 12 億トンにのぼる我が国の二酸化炭素総排出量は、その約 20%が自動車の排ガスに由来する (国交省 2011 年)。従って自動車産業では燃費向上が火急の課題であり、抜本的な車両空力抵抗の低減技術が求められている。加えて近年、横風時の安全性はもとより、高速走行時の操縦安定性に与える空気力の影響が国内外で議論されており、既存の風洞実験やレイノルズ平均モデル (RANS) に基づく数値解析での評価の限界が指摘されている。このような背景から申請者らは、ラージエディシミュレーション (LES) に基づく流体解析と、車両 6 自由度運動を連成させた次世代空力シミュレータを開発し (文献 1)、プログラム化した (FrontFlow/red-Aero)。この解析手法を用いて、車体周りに発生する非定常三次元渦構造と車両に作用する空気力、特に変動揚力や抗力について調べてきた結果、以下のことが明らかになった。

- ・ 車体周りの流れは各所から剥離した境界層と様々な後引き渦、及びコーナー部からの剥離渦で構成され、これらの渦は逆回転し合いながら相互作用を及ぼしている (文献 2)。かつそれぞれの渦は特定の不安定モードを有する (図 1)。これらの後引きや剥離渦は車体表面の微小な形状変化により、大きくその運動挙動が変わることがある。
- ・ 横風や車体の操舵時は、この渦が外乱で乱され、顕著な非定常空気力が車体に作用する。例えば車体が外乱でピッチやヨー加振された際は、空力モーメントの非定常特性が正負の振動減衰効果として作用する場合があります。車両運動の安定性に大きな影響を与える。即ち流れの最適化で、振動抑制することが可能である。(文献 3~5)
- ・ 同程度の平均空力抵抗の車体でも、その非定常特性には顕著な差が表れることがある。この抵抗の非定常特性は、ピッチ・ヨーモーメントの変動とも強い相関がある。さらに空力抵抗の非定常特性に着目し、特に抵抗が非定常的に低下した際の流れ構造を解析することで、さらなる抵抗低減の可能性を検討することができる。

以上の知見より以下の着想に至った。翼や円柱等で盛んに検討されている要素的流れ制御技術を導入し、場当たりに局所的な境界層剥離や特定の渦の抑制を行っても、全体としての空力発生メカニズムを理解しない限りその効果は限定的であり、全体としての性能向上は望めない。また抵抗低減のみに着目して流れを最適化した場合、運動性能や安全性を損なう可能性がある。即ち、空力抵抗を低減し、かつ安全安定走行が可能な車を実現するためには、「①車体全体の様々な渦の相互作用とそれによって誘起される境界層剥離メカニズムを形状を詳細に再現した上で統合的に理解」し、「②より流れ制御に適した構造になるよう車体全体の流れを誘導

し、その上で「③各渦や剥離の起点に戦略的に要素制御技術を適用」する必要がある。

### 2. 研究の目的

以上の背景より本研究では、自動車を想定した実用ブラフボディを対象に、表面複雑形状を忠実に再現した超大規模 LES 空力解析を実施し、車体表面からの境界層剥離とそれにより発生する車体周りの各種後引き渦の非定常相互作用を解明する。この知見により、自動車の空力抵抗削減と操縦安定性・横風安全性を両立させるための、戦略的流れ最適化手法の構築を目的とする。実用ブラフボディとしては、セダン型、ハッチバック型等の実車体を対象とし、車体形状と共に、表面の乱流境界層の主要乱流渦、境界層剥離に伴う後引き渦をほぼ全て再現し、車体に作用する空気抵抗や運動性能・安全性に寄与する非定常空力応答と流れ構造との関係を明らかにする。

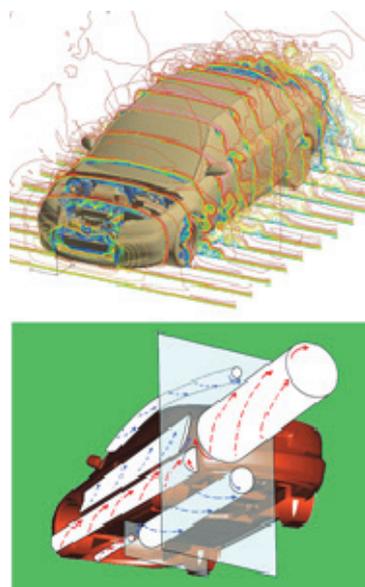


図 1 自動車周りの後引き渦構造

### 3. 研究の方法

次の (1)~(5)の研究課題を段階的に進める。

- (1) 実用ブラフボディ周りの渦の相互作用とそれに誘起される非定常境界層剥離メカニズムの解明
- (2) 非定常空力に着目した抵抗低減戦略の提案
- (3) 微小車両姿勢変化時の空力安定性評価手法の開発と流れメカニズムの解明
- (4) 履歴効果を伴う非線形空力入力時の安定・安全性評価手法の開発と流れメカニズムの解明。
- (5) 戦略的流れ最適化手法の構築

全ての過程において対象は実車車体形状とし、解析手法として、世界最大規模の非構造十億要素規模の LES を実施する。解析結果の検証には、広島大学所有の曳航水槽装置及び

マツダ（株）所有の実車風洞を用い、解析結果の実証には、実車による走行試験を実施する。

#### 4. 研究成果

##### (1) 実用ブラブボディ周りの渦の相互作用とそれに誘起される非定常境界層剥離メカニズムの解明

まず、本研究を通しての重要な基礎的知見を得るために、実車 CAD データを用いて、表面解像度 1mm 以下の、超大規模 LES 解析（非構造数十億要素、自動車空力では世界最大規模）を実施した。尚、ここでは車体姿勢は固定状態で解析を行った。対象はハッチバック型、セダン型、及びワゴン型（軽自動車）とし、車体周りの各所から発生する後引き渦と共に、その非定常作用により誘起される車体表面の境界層剥離を忠実に再現することで、定常空気抵抗や前後揚力値を風洞実験値に対して誤差 2%程度で予測することに成功した。

この解析結果を用いて、ドアミラーやタイヤホイール等から誘起される後引き渦に対して、その誘導抵抗を見積もる方法を提案した（この手法は 2017 年自動車技術会浅原賞を受賞）。解析結果より、車体全体の空気抵抗に対して、各種縦渦の抵抗寄与を図 2 に示す。これにより、誘導抵抗寄与の大きい縦渦を戦略的に流れコントロールすることで、抵抗低減を実現する目途が立った。さらに、こういった実形状車両を対象とした詳細 LES 解析結果に、固有直交分解（Proper Orthogonal Decomposition, POD）や（Dynamic Mode Decomposition, DMD）といったモード分解法を適用することで、各種後引き渦の不安定モード解析を行った。その結果を図 3 に示す。この結果から得られた主要な成果として、各後引き渦の主要不安定モードが明らかとなり、車体後方を大規模な縦渦の不安定モードと、車体屋根面やリアウィンドからの剥離の不安定性に相関があることが明らかになった。

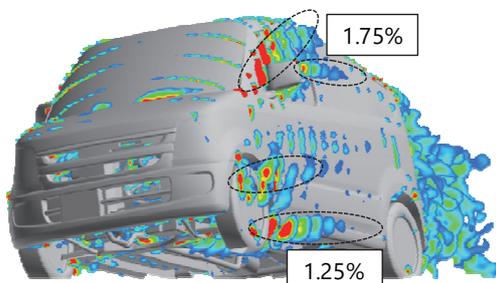


図 2 縦渦による抵抗が全抵抗に占める割合

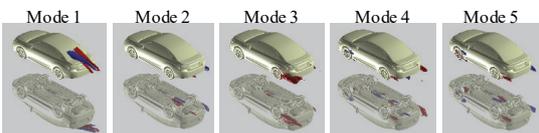


図 3 POD により抽出された主要な渦構造

##### (2) 非定常空力に着目した抵抗低減戦略の提案

「渦相互作用とその非定常特性」から得られた知見をもとに、抵抗値の非定常変動と流れ場の関係に着目した解析を行った。これまで得られた知見から、低抵抗時と高抵抗時では車体後部の後引き渦に大きな差異が観察され、特に高 Cd 時には左右で大きな非対称性が発生することを確認している。この Cd 変動はおよそ数 Hz の周期で比較的規則的に発生し、後引き渦の不安定モードと強い関係がある上、車体サスペンションシステムの固有振動数とも近いことから、走行安定性にも寄与することが示唆されている。ここではまず、この後引き渦が車両空力性能に大きな影響を与えるセダン型車両を対象として、高速走行時の外乱としてピッチ加振した際の車両周り渦構造の変化に着目した解析を行った。具体的には、サスペンションシステムと同じ固有振動数の流れ現象に着目し、モード解析法 DMD を適用することで、高速走行安定性に大きく寄与する流れ構造の抽出を行った。その結果を図 4 に示す。戦略的な抵抗低減の一案として、車体固有ピッチ加振モードと近い変動特性を持つ流れ構造を抽出し、その部分に空力パーツを付加することで、車体後部の縦渦構造を弱め、空気抵抗を数%低減することに成功するとともに、高速走行安定性や乗り心地に寄与すると考えられる揚力変動の低減にも成功した。

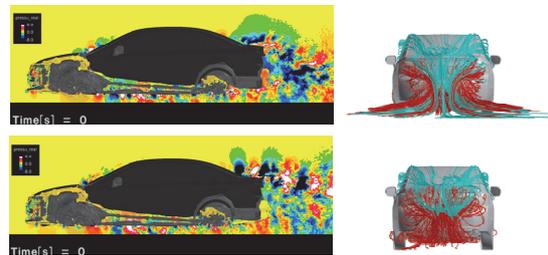


図 4 ピッチ加振時の後流・渦構造  
（上：原型車、下：空力改善車）

##### (3) 微小車両姿勢変化時の空力安定性評価手法の開発と流れメカニズムの解明

高速走行操舵時の車体姿勢変化は各回転角に対して最大 2~3° 程度であり、その時定数はサスペンションシステムの固有振動数から数 Hz 程度である。ここではこの微小車両姿勢変化時に発生する非定常空力と、その空力運動安定性評価手法の開発を行った。具体的には、セダン型車両を模擬した 1/5 スケールモデルを用いて、定常円旋回状態の曳航水槽模型試験を実施し、車両運動に伴って発生する流体力を計測した（図 5）。

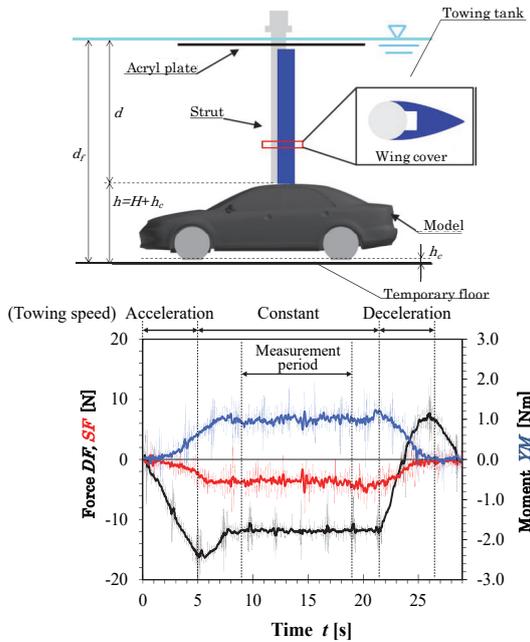


図5 動的曳航水槽実験に用いた車両と流体力

得られた結果に対して空力微係数法に基づく評価を行い、車両の旋回運動と横すべり運動に伴う発生空気力を定量評価した。さらに、周期的な旋回運動（蛇行運動）や横すべり運動などを与える動的な曳航水槽試験により空力微係数法に基づく周期変動流体力の評価を実施し、操舵走行中の車両運動に伴う付加質量と付加慣性モーメントを定量評価した。これにより、操舵走行時の車両運動に伴って発生する空気力を定量評価するとともに、空力安定性評価手法の開発に向けた検証用データベースを構築した。

(4) 履歴効果を伴う非線形空力入力時の安定・安全性評価手法の開発と流れメカニズムの解明

微小車両姿勢変化時に対して、急な車体姿勢の変化や追い越し・すれ違い、横風突風が車体に作用した場合、車両周辺の気流が急激に変化し、翼失速に類した過渡特性や履歴効果が発生する。このようなケースは実際の車両走行時にしばしば遭遇し、操縦安定性のみならず走行安全性に大きく影響を与えるが、③の空力微係数法の適用が不可能な流れ場である。ここでは特に、「横風突風」を対象として大規模 LES 解析を実施し、車体表面からの突発的な境界層剥離とそれに伴う縦渦の非定常変動に着目し、特に車両の走行安全性に寄与する空力ピッチ・ヨーモーメントの変動との関係を明らかにした。より精密な安全性評価のために、ここではドライバーの操舵応答も考慮した気流と車両6自由度運動の連成解析を実施した。

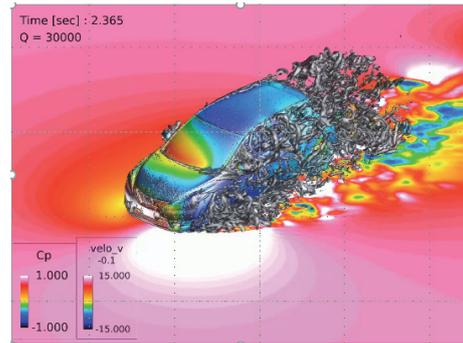
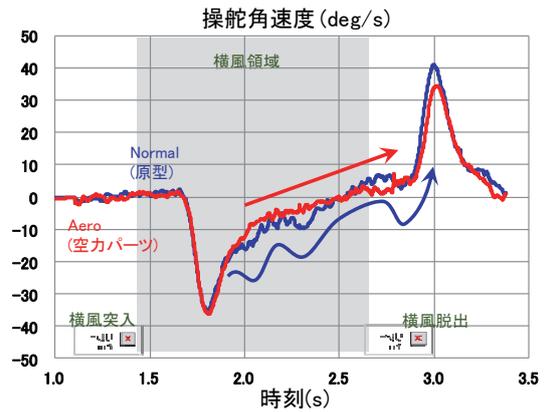


図6 横風突風下の操舵応答と渦構造

ここでは、ドライバーの操舵応答も考慮した車両6自由度運動と大規模 LES 解析の連成解析システムを構築し、実車形状に対して突風時の自動車挙動予測を行った。基準車両形状と、空力による操縦安定性の向上が確認されている改善車両形状を比較し、車両運動性能向上に寄与する流れメカニズムの解明を行った。特に車体表面からの突発的な境界層剥離とそれに伴う縦渦の非定常変動に着目し、走行安全性に寄与する空力ピッチ・ヨーモーメントの変動との関係を明らかにした。図6に結果を示す。空力パーツを付加した車体では、ドライバーの操舵角変化が原型に対して抑えられており、操縦安定性が向上したことが確認される。流れの特性としては特に車体後端の側面から車体後流への流れ込みの過渡応答が影響していることが原型車体と空力パーツ付加車体の流れ構造の違いから示唆され、パーツの付加によるヨーモーメント応答の時間遅れを抑制することが、重要であることがわかった。

(5) 戦略的流れ最適化手法の構築

ここまで得られた空気抵抗低減と車両運動性能の向上を実現するための知見を、車体形状を変化させることなく実現する最適化手法として、流れ制御用の流体素子に着目し、その有用性を検討した。ここでは流体吹き出し素子としてプラズマアクチュエータに着目し、その挙動の数理モデルを開発したシミュレーションシステムを導入し、簡易セダン形状を対象として検証を行った。プラズマアクチュエータを用いた検証用の自動車空力

実験は、広島大学がマツダと連携して行い、数値シミュレーションは神戸大が担当した。セダン型車両を模擬した単純形状モデルに対して、能動的な流れ構造の制御による空気抵抗低減を目指して、車体後端側面から車体後流への流れ構造に着目し、車体側面での剥離制御を目指した。まずは既報の単純翼形状を対象に、実験や高精度差分で得られている結果を再現するために必要な格子解像度や数値スキームのチューニングを行った。次に実際のプラズマアクチュエータを用いた簡易車両風洞実験を行い、その流れ制御の有用性を検証すると共に、数値シミュレーション検証用のデータ（車体空力及び車両周り流れ構造）を取得した。得られた結果を数値シミュレーションの結果と比較し、その妥当性を検証した。ここでは特に車体後端に発生する縦渦構造（後引き渦）に着目し、縦渦構造を制御することで空気抵抗低減と車体走行安定性に寄与する揚力変動の抑制を狙った。アクチュエータの貼り付け位置とアクチュエータ出力を変化させたときの、縦渦の変化を図7に示す。アクチュエータを停止させた場合の渦構造（左端）に対して、強度を上げていくと、縦渦自体は吹き出し方向により強められるが、車体から離れることでこの部分に発生する誘導抵抗が低減され、数%の抵抗低減に成功した。

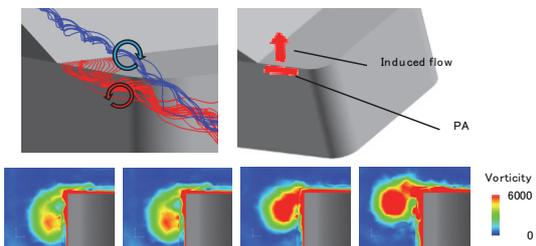


図7 DBDPAを用いた流れ制御による抵抗低減

#### <引用文献>

- ① Takuji Nakashima et al., Coupled analysis of unsteady aerodynamics and vehicle motion of a road vehicle in windy conditions, J. Computers & Fluids, vol.80(10), 2013, pp.1-9
- ② Makoto Tsubokura et al., Computational Visualization of Unsteady Flow around Vehicles Using High Performance Computing, J. of Computers & Fluids, , 2009, vol. 38, pp. 981-990
- ③ See-Yuan Cheng et al., Aerodynamic Stability of Road Vehicles in Dynamic Pitching Motion, J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2013, vol.122, pp.146-156
- ④ See-Yuan Cheng et al., Numerical Quantification of Aerodynamic Damping on Pitching of Vehicle-Inspired Bluff Body, J. Fluids and Structures, 2012, vol. 30, pp.188-204
- ⑤ See-Yuan Cheng et al., A Numerical Analysis of Transient Flow past Road

Vehicles Subjected to Pitching Oscillation, J. of Wind Eng. Ind. Aerodyn., 2011, vol.99, pp.511-522

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 12 件)

- ① Kousuke Nakasato, Makoto Tsubokura, Jun Ikeda, Keiji Onihisi, Shoya Ota, Hiroki Takase, Kei Akasaka, Hisashi Ihara, Munehiko Oshima, Toshihiro Araki: Coupled 6DoF Motion and Aerodynamic Crosswind Simulation Incorporating Driver Model, SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, 査読有, 10(2), 2017, 2017-01-1525  
DOI: 10.4271/2017-01-1525
- ② 池田隼, 坪倉誠, 中江雄亮: ロール・ヨー複合運動中の乗用車に関する非定常空力解析, 日本機械学会論文集 (Transactions of the JSME, in Japanese), 査読有, 第 82 巻, 835 号, 2016,  
DOI:10.1299/transjsme.15-00675
- ③ Jing Li, Makoto Tsubokura, Masaya Tsunoda: Numerical Investigation of the flow around a golf ball at around the critical Reynolds number and its comparison with a smooth sphere, Flow, Turbulence and Combustion, 査読有, vol. 95, 2015, pp.415-436,  
DOI: 10.1007/s10494-015-9630-4
- ④ 坪倉誠, 中島卓司: 自動車の操縦・走行安定性に寄与する空気力, 自動車技術 (日本自動車技術会会誌), 査読無, 第 69 巻第 7 号, 2015, pp.73-78, ISSN 0385-7298  
<http://tech.jsae.or.jp/kaishi/pc/index.aspx?id=jk201507>
- ⑤ 中島卓司, 坪倉誠, 岡田義浩, 農沢隆秀, 溝兼通矢, 土井康明: 定常円旋回時の自動車に作用する空気力について, 日本機械学会論文集 (Transactions of the JSME, in Japanese), 査読有, 日本機械学会論文集 (Transactions of the JSME, in Japanese), 2014, 第 80 巻, 818 号  
DOI:10.1299/transjsme.2014fe0301

[学会発表] (計 57 件)

- ① Makoto Tsubokura (invited talk): Applied aerodynamics simulation on the K computer; from golf ball to urban wind, The 1<sup>st</sup> JARA-HPC Symposium, JHPCS 2016, Oct. 04-05, 2016, Aachen (Germany)
- ② Makoto Tsubokura (invited talk): Some updated results obtained by the

next-generation aerodynamics  
simulator on the K computer, 12.  
Tagung: Fahrzeug-Aerodynamik, Haus  
Der Technik, July, 05-06, 2016,  
Munich(Germany)

- ③ 坪倉 誠 (特別講演) : 京からポスト京  
へ 大規模 CFD が拓く新たな応用空力シ  
ミュレーション, 第 29 回数値流体力学  
シンポジウム, 2015年12月15日~17日,  
九州大学筑紫キャンパス(福岡県春日市)
- ④ Makoto Tsubokura (invited talk):  
Development of the new vehicle  
aerodynamics simulator for the  
next-generaion on the supercomputer  
“K computer”, 11. Tagung :  
Fahrzeug-Aerodynamik, Haus Der  
Technik, July, 08-09, 2014,  
Munich(Germany)

[その他]

ホームページ等

[http://www.lab.kobe-u.ac.jp/csi-cfd/jp/  
pages/members/members.html](http://www.lab.kobe-u.ac.jp/csi-cfd/jp/pages/members/members.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

坪倉 誠 (TSUBOKURA, Makoto)  
神戸大学・大学院システム情報学研究科・  
教授  
研究者番号 : 40313366

### (2) 研究分担者

中島 卓司 (NAKASHIMA, Takuji)  
広島大学・大学院工学研究院・助教  
研究者番号 : 40444707

大西 慶治 (Onishi, Keiji)  
理化学研究所・計算科学研究機構・特別研  
究員  
研究者番号 : 90650036

### (3) 連携研究者

### (4) 研究協力者

農沢 隆秀 (NOUZAWA Takahide)  
マツダ株式会社・技術研究所・技監