

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06159

研究課題名（和文）他の進行物体から受ける空力的外乱に強い3次元ブラフボディ周り流れ構造の実現

研究課題名（英文）Realization of flow structure around a 3D bluff body less subject to aerodynamic disturbances from another bluff body

研究代表者

中島 卓司 (NAKASHIMA, Takuji)

広島大学・工学研究科・助教

研究者番号：40444707

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、主に並走する自動車を想定した地面効果中を進行する2つの3次元ブラフボディを対象とし、他のブラフボディの影響で生じる空気力特性の変化と、その原因となる空気力学的現象を調査した。空気力学的現象については、他のブラフボディが単独で進行する際に生じる圧力分布と相対風向変化が生み出しつる影響と、2体が相互干渉することではじめて生まれる影響に分類して、これを明らかにした。さらに、その調査結果に基づき、他の進行物体から受ける空力的外乱に強い3次元進行ブラフボディの実現に有効な空力技術を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、実際に自動車が路上を走行する際に起こり得る、他の車両と並走するような環境下で起きる空気力学的現象を調査し、それらの現象が引き起こす自動車の空力性能変化を明らかにした。これによって、他の自動車と並走したり、追抜かれたりする実走行環境下で、空気力学的性能が低下することを抑制するために考慮すべき要素が明確化された。さらに、基礎的なボディ形状ながらも具体的な性能改善技術についても示した本研究の成果は、実際の走行環境において空力性能を維持可能な自動車空力設計の実現へとつながることが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we investigated aerodynamics of two three-dimensional bluff bodies traveling parallel under the ground effect, mainly assuming a parallel running automotive. We investigated the aerodynamic phenomena caused by an aerodynamic interaction with the other bluff body and clarified the causes of changes in aerodynamic characteristics. We classified and clarified the aerodynamic effects from another bluff body as three kinds of phenomena that were pressure distribution and relative wind direction change produced by the other bluff body traveling alone, and the effects produced by the two bluff bodies' interaction. Furthermore, based on the results, we proposed aerodynamic techniques for realizing a three-dimensional bluff body that is resistant to aerodynamic disturbances from other traveling bluff body.

研究分野：輸送機器流体力学

キーワード：流体力学 空力的外乱 非定常空気力 3次元ブラフボディ 渦構造 自動車空力 輸送機器流体力学
応用空気力学

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

自動車や鉄道のような陸上輸送機器に作用する空力現象は、流体力学的には平面(地面)近傍を進行する複雑な形状の3次元ブラフボディ周りの流れの現象と解釈できる。そのような流れ場では、ボディ局所から発生する縦渦構造が互いに干渉しあい⁽¹⁾、さらに地面効果も加わることで、非常に複雑な流場が形成される。また、例えば比較的単純な形状であっても、わずかな風向・風速の変化によってボディ局所の角部や曲面における境界層の剥離性状が変化するなど、複雑な応答を示すことがある。そして、自動車などの実用環境では、前走ブラフボディへの追従や、進行速度ベクトルが異なるブラフボディとの遭遇など、他のブラフボディとの流体力学的干渉が生じやすい環境にある。このため、実用的な3次元ブラフボディの空力特性を論じる上では、他のブラフボディが形成する様々な形態の流れの影響の考慮は必要不可欠と言える。

進行物体を想定した2物体周りの干渉流れについては、並走や縦列走行などの定常状態と異なる移動速度を持つ過渡・非定常状態ともに多数の検討事例があり、自動車とバスの模型を対象とした追抜き時空気力の動的風洞計測⁽²⁾、隊列走行する長方形ボディの空力解析⁽³⁾など様々な検討が行われている。しかし、他の移動物体が形成する圧力分布や後流の影響などの流体力学的現象を指摘し、様々な形状における干渉特性が個別に議論しているものが大半である。また、より普遍的な流体现象について半理論的な検討⁽⁴⁾もなされているが、単純形状での検討にとどまっている。このため、個々の設計において流体力学的に詳細な検討を行わずとも、他のブラフボディからの流体力学的影響に対して好適な特性を有するブラフボディ形状の設計を可能にするには、より複雑な3次元ブラフボディにおいて普遍性のある知見を得るための検討が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、主に自動車を想定した地面効果中を進行する複数の3次元ブラフボディを対象に、互いのブラフボディが生じる空力的な外乱によって生じる作用空気力特性の変化とその原因となる空気力学的メカニズムを明らかにする。その上で、その空気力入力によるボディの運動特性への影響も含めた評価に基づき、他の進行物体から受ける空力的外乱に強い3次元進行ブラフボディを実現する技術を提案する。

3. 研究の方法

(1) 対象とした相互干渉するブラフボディの進行条件：本報告書では、特に側方を進行する他のブラフボディから受ける流体力学的影響についての研究成果について述べる。側方を同方向へ平行に進行するブラフボディが存在する進行ブラフボディについて、図1のように定義する。ここでは、流体力学的干渉影響の調査対象とした側の進行ボディ(以降、注目モデルとする)が速度 U_0 で前進している側方を、影響を与える側の進行ボディ(以降、側方モデルとする)が速度 U_0+U_1 で平行に進行している状態を考え、2ボディ間の側方間隔を距離 Y 、注目モデル後端から側方モデル前端までの前後方向距離を X (進行方向が正) と定義している。

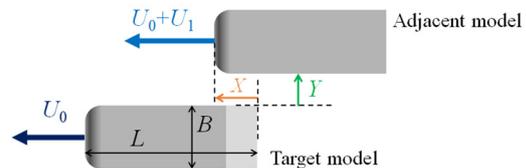


図1. 2ボディの進行条件の定義

(2) 対象モデル：対象モデルとして、走行する自動車周りに生じる流れの特徴を再現可能な簡易形状ブラフボディの組み合わせを設定し、その流体力学的な干渉を調査した。本報告書では、図2と図3に示す、2種類のブラフボディの組み合わせによる検討結果について示すこととし、以降はそれぞれ対象モデルA、Bと称することとする。ここで、図2の対象モデルAはAhmedら⁽⁵⁾により提案された、自動車の特徴的な後流パターンを再現可能な簡易車両模型、いわゆるAhmedモデルである。注目モデルは、形状パラメータである背面傾斜角(slant角)を 32° とし、側方モデルはslant角 0° のモデルとした。寸法は共にAhmedらによるモデルの80%である。また、図3に示した対象モデルBはセダン型乗用車周りに特徴的な流れ構造を再現した簡易車両模型を注目モデルとし、大型車両を模した簡易トラック模型を側方進行モデルとした。両モデルは実車の1/5スケール相当の寸法で、注目モデルは対象モデルAと同等の寸法である。

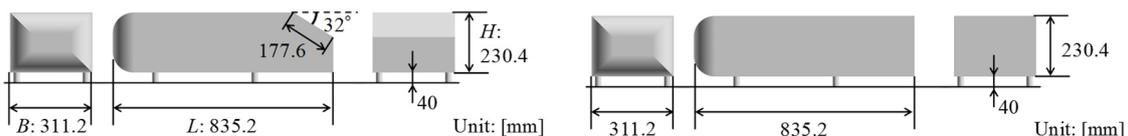


図2. 対象モデルA (左：注目モデル、右：側方進行モデル)⁽⁵⁾

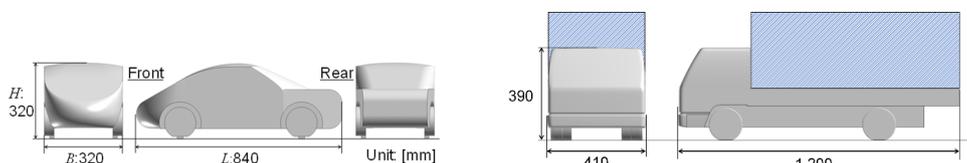


図3. 対象モデルB (左：注目モデル、右：側方モデル；青斜線部は着脱可能コンテナ)

(3) 数値解析手法：本研究では、非圧縮性 Navier-Stokes 方程式系の質量保存式と運動量保存式を支配方程式とし、Large-Eddy Simulation による乱流モデリングを施すため、両保存式に空間フィルタ操作を加えた 2 方程式を基礎方程式とした。SGS 乱流応力項を評価する SGS 乱流モデルには標準 Smagorinsky モデルを用い、Smagorinsky 定数 C_s は 0.15 とした。基礎方程式の離散化には節点中心型の有限体積法を用い、速度と圧力のカップリングには SMAC アルゴリズムを用いた。空間離散化スキームには 2 次精度中心スキームを用いた。ただし、解の発散を抑制するため、運動量の対流項には 1 次精度風上成分を 5% ブレンドした混合スキームを用いた。また時間積分には Euler 陰解法を使用した。解析ソフトウェアには FrontFlow/red-Aero-HPC を使用した。

図 4 に解析領域と境界条件の概要を示す。各 1 モデルを含む 2 つの矩形断面領域を設定し、両者の近接面で領域を結合もしくはスライドすることで、2 モデル間の相対位置や速度を任意に変更可能な領域設定とした。解析領域の寸法は、長さ、幅、高さのいずれも、対象モデルの各寸法の 8-12 倍とし、断面閉塞率が 1% 以下となるように設定した。

解析格子は主に四面体を用いて分割した。ただし、2 領域の接合面近傍については、他方の領域と情報交換する際の補間精度を維持するため、スライド方向に等間隔な直交格子（六面体セル）を用いて分割した。また、対象モデル A の解析では、モデル表面に 5 層の三角柱（プリズム）格子層を挿入した。総節点数は、600 ~ 1,000 万点程度とした。

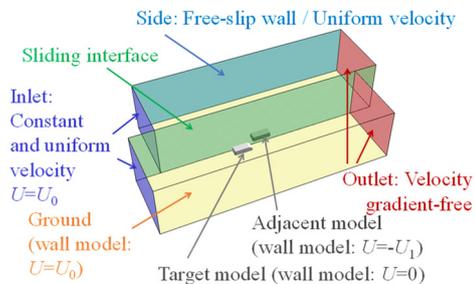


図 4 . 数値解析領域と境界条件

(4) 風洞試験法： 広島大学所有のゲッチング型風洞試験装置を使用した。地面上の境界層影響を低減するため、計測部テーブル上に平板を設置し（地面板）、その上に対象模型を設置した。対象模型は計測部内で静的に固定し、4 輪のタイヤもしくはそれに相当する 4 本の支柱を支える梁状の治具を介して、地面板上側に設置した分力計に接続した。一方、側方モデルをリニアレール上のスライダーに固定し、2 モデルの相対位置が動的に変化する試験を実現した。モデル間の進行速度差 U_1 を与える動的試験の際には、計測部下方のステップモーターを用い、モデルに接続したワイヤーを地面板上流の滑車を介して巻き取ることで、側方モデルを動的に移動させた。模型に作用する空気力成分を分力計により計測するとともに、半導体圧力センサにより模型表面圧や周囲総圧等を計測した。各センサの出力は、歪みアンプと A/D 変換器を兼ねるセンサインターフェースを介して、デジタルデータとして PC に収録した。

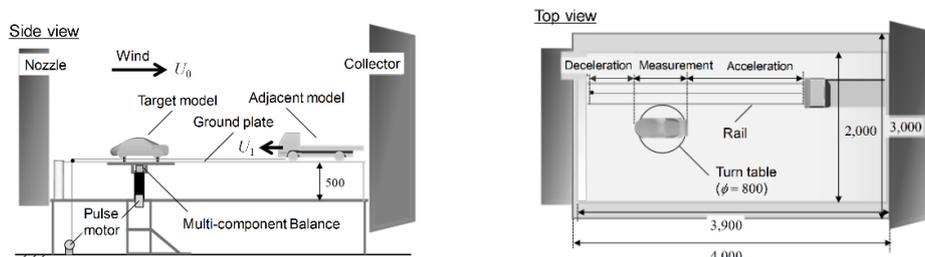


図 5 . 風洞試験セットアップ概要（左：側面図、右：上面図）

4 . 研究成果

(1) 並走・追い抜き状態の他ボディからの流体力学的影响：本項では、対象モデル B における風洞試験計測に基づく検討結果を示す。図 6 は、側方進行モデルの前後方向相対位置に対する注目モデルの空気抵抗係数の単独進行時からの変化 ΔC_D を示している。2 つのグラフは、幅方向のモデル間間隔と側方進行モデルの形状（トラック荷台のコンテナ相当部品の有無）による C_D のプロファイルへの影響をそれぞれ示している。側方進行モデルが注目モデルの後端に差し掛かる $X/L=0$ を超えた辺りから注目モデルの空気抵抗が急激に増加する。そして、側方進行モデルの先端が注目モデルの前後中央やや後方（ $X/L \sim 0.4$ ）にある場合に、空気抵抗の増加は極大となる。また、同図左より、2 モデルが幅方向に接近するほど空気抵抗増加量の極大値が大きくなることが示されている。この傾向は既往の研究（文献⁽⁴⁾など）の報告とも一致する。

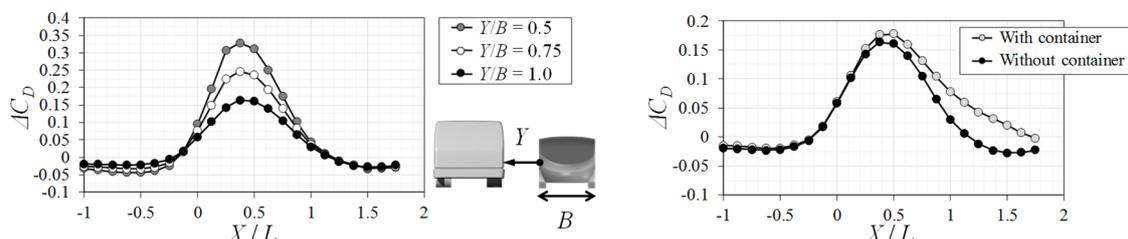


図 6 . 対象モデル B における側方進行モデルの位置に対する注目モデルの空気抵抗変化（左：幅方向間隔影響、右：側方進行モデル形状影響）

同図左では、荷台部品が付加されて側方進行モデル後部の側方面積や体積が増加すると、その真横からやや後方に注目モデルが存在する $X/L=1.0\sim 1.5$ の区間で特に空気抵抗増加量が大きくなることが示されている。

(2) 流体力学的影響の分析： 本項では引き続き対象モデルBを対象とし、数値解析に基づく分析を示す。側方進行モデルからの流体力学的影響として、既往の研究で論じられた現象は、主に以下の3種類に集約される。

- [1] 側方進行モデルが周囲に形成する圧力場が注目モデルに作用する
- [2] 側方進行モデルが形成する流れにより、注目モデルに作用する相対気流の流向が変化する
- [3] 2モデルが流体力学的に相互に干渉し、各モデルが単独では生じ得ない流れ現象を生じる

ここで本研究では、[1]の要素を側方進行モデルが単独で形成する周囲流場から推算する事で、残りの[2],[3]の現象による影響の和と分離して、定量的に評価する方法を考案した。図7は注目モデルと側方進行モデルが各々単独で進行した際に周囲に形成する圧力場を重ね合わせることで、2モデルが平行に進行している場合の周囲圧力場と類似な圧力場を表現できることを示している。また、両者の差異の一部は、注目モデルに一樣斜め風が作用した際と類似な周囲圧力の変化であることも確認しているおり、上記の現象分類と分離評価法の妥当性を示している。

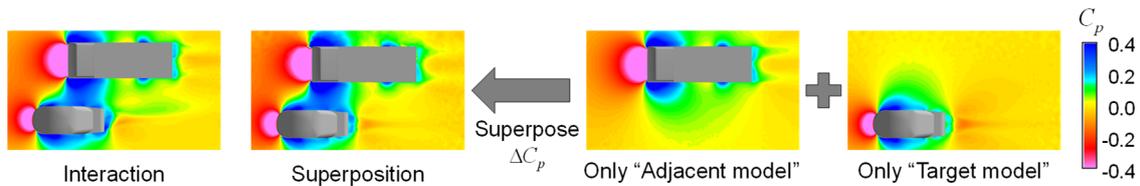


図7 . 周囲圧力分布の比較(左：相互干渉時、中：各モデル単独の圧力変化(右)の重ね合わせ)

このような評価方法を用いて、側方進行モデルの影響による流体力変化を、[1]の「圧力場影響」と[2]+[3]の「剰余影響」に分離して見積もると、図8左図に示す様に「圧力場影響」が抵抗変化のプロファイルの特徴づけていること、一方で[2]相対風向変化や[3]相互干渉による「剰余影響」は幅広い相対位置で無視できないオーダの流体力変化を生じていることが示された。

また、側方モデルが注目モデルよりも速い進行速度で ($U_1 > 0$) 注目モデルを追い抜く場合についても同様に分析を加えた。側方モデル周囲の圧力変化の大きさは、Reynolds 数影響を無視すれば、同モデルの進行速度の2乗に比例するため、[1]の成分を並走 ($U_1 = 0$) 時の $(U_0 + U_1)^2 / U_0^2 = 1 + (U_1/U_0)^2$ 倍として見積もった。そこに並走 ($U_1 = 0$) 時の「剰余影響」を加味することで、速度差の影響が大きくなるとされる、速度差2割以上の $U_1 = 0.25U_0$ であっても、図8右図のように抵抗変化のプロファイルを概ね再現できることを示した。

一方、「圧力場影響」は注目モデル側の概形により決定されるため、側方進行モデルの影響を注目モデル側で制御する余地は、むしろ「剰余影響」にある。そこで注目モデルの各部位で両影響が各々どの程度現れているかを調査した(図9)。この結果、対象モデルBの注目モデルの空

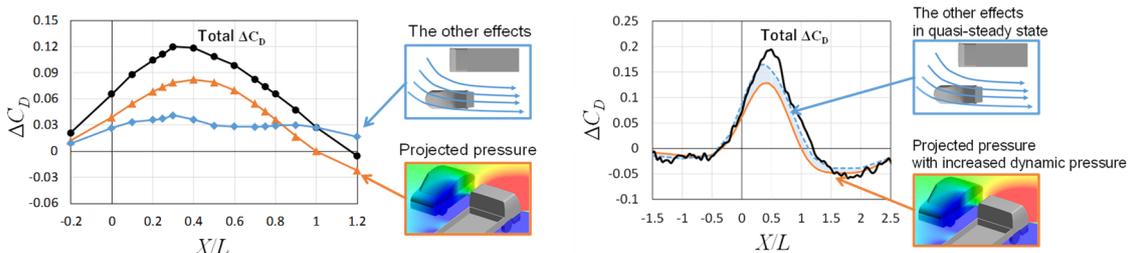


図8 . 側方進行モデルによる影響の分離評価(左：並走時($U_1=0$), 右：追い抜かれ時($U_1=0.25U_0$))

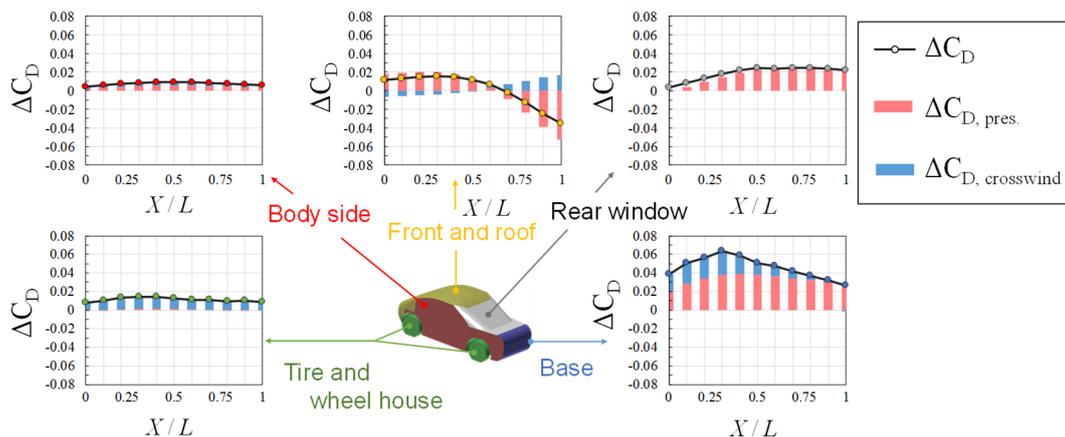


図9 . ボディ各部位における側方進行モデルによる影響の分離評価

気抵抗変化に関しては、地面とボディの間に突出した「タイヤ」部とボディ背面で「剰余影響」が大きく、側方進行モデルの影響の抑制には、これらの部位に注目すべきであることを示した。

(3) 側方進行モデルの影響による顕著な流体力変化とこれを改善する能動的流れ制御：本研究では、側方進行モデルの影響により注目モデルの後流形態が変化し、急激に作用流体力が変化する現象が複数の対象モデルで観測された。本項では、対象モデルAにおける急激な流体力変化とその要因となった流動現象、および能動的流れ制御によるその抑制技術の構築について述べる。

並走状態と追い越され状態 ($U_1=0.05 U_0$) の対象モデルAについて、側方進行モデルの影響による抗力・揚力係数の変化量を図10に示す。図には、代表的な相対位置における対象モデル周りの総圧等値面 ($C_{pt}=0.0$) と背面圧力係数 C_p の分布も併せて示した。なお、追い越され状態のグラフや可視化は0.1s間の移動平均データによるものである。グラフより、わずか5%の速度差の有無で、抗力や揚力の変化量が大きく異なることが示されている。そして、そのような急激な流体力変化の要因は、モデル後部傾斜面上の剥離流れの形状(総圧等値面)が異なり、その結果として傾斜面上の圧力も異なるためであることが示されている。このような空気力の変化が偶発的に生じれば、自動車であれば、予期せぬ操縦性の変化や空気抵抗の増大を生むこととなる。

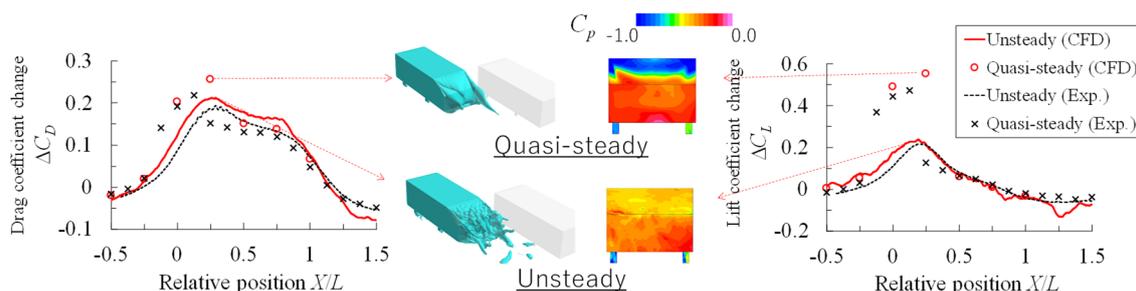


図10．対象モデルAにおける抗力と揚力の変化と後流の可視化(総圧等値面と背面圧分布)

一方、このような後流形態の変化に伴う急激な空気力変化は一樣な斜め相対風を作用させた場合にも生じることが確認されており、その空気力の急変を抑制するための流れ制御技術として、傾斜面上端から流れと逆向きにスリット状のノズルから噴流を作用させる制御が提案されている⁽⁶⁾。本研究では、この流れの制御技術を応用し、側方進行モデルの影響で生じる空気力変化の抑制を試みた。その結果、図11に示す様に、側方進行モデルの影響による抗力の急激な増大を抑制することができた。なおこの時、ノズルのスリット高さはモデル高さの1%未満で、噴流流速も作用流速の2割である。

以上の流れ制御の成功は、一樣な相対風向変化に対する空力の改善に有効な局所部位の空力改善が、側方進行モデルの影響を抑制や改善するうえで有効であることを示している。これは、図9における検討で得られた知見に通ずるものであり、他の進行物体からの流体力学的影響による流力特性変化を改善、向上するために考慮すべき要素が明らかとなったと言える。

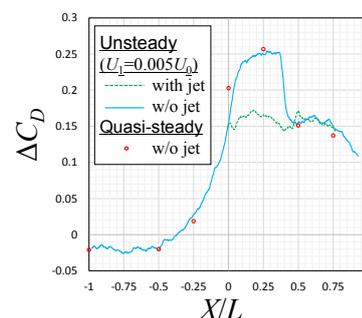


図11．能動的流れ制御による空気力変化の抑制

<引用文献>

- (1) 農沢隆秀ら，“自動車の空気抵抗を増大させる車体周りの流れ構造：第2報 セダン車体の特徴的な流れ構造,” 日本機械学会論文集(B編), Vol.75, No.757 (2009), pp1807-1813.
- (2) 山本智ら，“追い越され時の空気入力と車両挙動,”自動車技術会学術講演会前刷り集,956号 (1995), pp.117-120.
- (3) Uystepuyst, D. and Krajnović, S., Numerical Simulation of the Transient Aerodynamic Phenomena Induced by Passing Maneuvers, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol.114 (2013), pp.62-71.
- (4) 加藤義和ら,自動車に追い越される自転車の空力的影響に関するシミュレーション*大産大産業研究所所報,3号 (1980).
- (5) Ahmed, S. R., Ramn, G. and Faltin, G., Some Salient Features of the Time-Averaged Ground Vehicle Wake, SAE Transactions, Vol.93, Section2, (1984), pp.473-503.
- (6) Nakashima, T., et al., “Wake Flow Visualization of a Simplified Vehicle Model During Flow State Change,” Proceedings of AJK-Fluids 2019, no. AJKFLUIDS2019-5404, (2019).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 SHIMIZU Keigo, NAKASHIMA Takuji, HIRAOKA Takenori, NAKAMURA Yusuke, NOUZAWA Takahide, DOI Yasuaki	4. 巻 7
2. 論文標題 Aerodynamic drag change of simplified automobile models influenced by a passing vehicle	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 19-00366
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1299/mej.19-00366	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 YAN Chao、中島 卓司、坪倉 誠
2. 発表標題 側方走行車両の影響を受ける簡易車両モデルの非定常空力解析
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 清水 圭吾、中島 卓司、平岡 武宜、中村 優佑、農沢 隆秀、土井 康明
2. 発表標題 側方走行車両による簡易車両モデルに生じる空気力の履歴効果
3. 学会等名 自動車技術会2019年秋季大会学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuji Nakashima
2. 発表標題 Unsteady aerodynamics of automobile under real-world conditions
3. 学会等名 The 20th International Conference of Fluid Power and Mechatronic Control Engineering (ICFPMCE 2019)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keigo Shimizu, Takuji Nakashima, Takenori Hiraoka, Yusuke Nakamura, Takahide Nouzawa
2. 発表標題 Investigation of Increase in Aerodynamic Drag Caused by a Passing Vehicle
3. 学会等名 WCX World Congress Experience (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島 卓司, 清水 圭吾, 松浦 恭平, 平岡 武宜, 中村 優佑, 農沢 隆秀
2. 発表標題 側方走行車両により簡易車両モデルに生じる空気抵抗変化の数値解析的検討
3. 学会等名 自動車技術会2018年春季大会学術講演会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----