

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420115

研究課題名(和文) 突発事象に伴って3次元ブラフボディに作用する過渡的空気力に関する研究

研究課題名(英文) A study on transient aerodynamics of a 3D bluff body caused by a sudden event

研究代表者

中島 卓司 (Nakashima, Takuji)

広島大学・工学研究院・助教

研究者番号：40444707

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：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3次元ブラフボディを対象に、突発的な相対風向変化やボディの運動に伴ってブラフボディに作用する空気力の特性とその発生メカニズムを調査した。既往の研究で指摘されている自動車周りの主要な流れ構造に注目し、後曳き渦(ブラフボディ後流)と相互干渉するピラー渦を再現する2系統4種のブラフボディを対象に検討を加えた。突発的外乱としては、レーンチェンジ運動、仮想的な相対風向の過渡変化、ピッチ自由減衰振動などを与えた。各条件において対象ブラフボディに作用する過渡空気力の差異とその要因となる流れ構造を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：In this study, aerodynamics of a three-dimensional bluff body moving in a ground effect has been studied, especially focusing on transitional aerodynamic characteristics induced by a sudden event. Based on the important flow structures around an automobile, two groups of bluff bodies, which can reproduce a typical wake structure or pillar vortices, have been investigated. Lane-change maneuver, transitional change of relative wind direction, and free damped vibration in pitching motion were considered as target conditions for the sudden event. Transitional aerodynamic force acting on the bluff bodies in each condition have been investigated and flow structures that cause difference of the transitional aerodynamics have been clarified.

研究分野：流体工学

キーワード：応用空気力学 過渡空気力 非定常空気力 3次元ブラフボディ 渦構造 自動車空力 空力微係数法

### 1. 研究開始当初の背景

自動車や鉄道に代表される地面近傍を進行する3次元ブラフボディ周りでは、ボディ局所から発生する縦渦構造が互いに干渉しあい、さらに地面効果の影響もあって非常に複雑な流場が形成されている。また、例えば比較的単純な形状であっても、わずかな姿勢の変化や風向・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、3次元ブラフボディ周り流れの空力特性を対象とした研究報告は未だに数多くあり、学術的にも興味深い流場である。

一方で、近年の自動車工学分野においては、車両運動における車体の空気力学的特性の重要性が増しており、非定常的な空力特性への注目の高まりから、動的姿勢変化時や非定常風向変化時の車両の非定常空力特性の解明などが盛んに行われはじめています。それらの研究では、ある固有の外乱に伴って生じる現象についての発見的な報告や、発生流体力の定量的評価は見られるものの、各局所流れの応答メカニズムの観点からそれらの現象を体系的に分析、議論した研究例は見られない。加えて、そのような多くの非定常空力特性に関する研究では、単一周波数の外乱を与えた際の空力的応答を調査している。

しかし、自動車のような走行物体に作用する外乱を考えたとき、その多くは急な操舵に伴う走行運動の変化、突然の横風、路面凹凸による上下動などの突発的で過渡的な外乱が多い。局所に角部や曲面を有する3次元ブラフボディでは、流線形物体に比べて局所流れの状態遷移が起こりやすく、履歴効果が増大しやすい。例えば、トラックが強横風域に突入した際には、過渡状態のボディ角部から縦渦が発達・崩壊する過程が過渡的な空力応答の要因となることが数値的に予測された事例などがある。

### 2. 研究の目的

以上の背景を踏まえ、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3次元ブラフボディを対象に、走行中の急激な操舵や風・路面凹凸などの突発的外乱によってブラフボディへと作用する空気力の特性とその発生メカニズムを解明することを目的とした。

特に、流線形物体では生じにくい局所の剥離流れや、対地姿勢変化により生じる地面効果中での局所流場の応答遅れなど、地面効果中を進行する3次元ブラフボディに特有な現象に注目し、その過渡的特性を調査解明することを目指した。この時、対象ブラフボディ周りに形成される特徴的な流れ構造を取り上げ、突発的な条件変化に対するそれぞれの過渡的応答を解明することで、突発事象により地面効果中を進行する3次元ブラフボディに作用する過渡空気力の特性の体系化を試みた。

### 3. 研究の方法

#### (1) 対象ブラフボディ

本研究では、既往の研究で指摘されている自動車周りの主要な流れ構造に注目し、突発的な条件変化に対するそれぞれの流れや渦の過渡的応答を調査することとした。注目する具体的な流れ構造としては、[1]後曳き渦(ブラフボディ後流)と[2]相互干渉するピラー渦を採り上げ、それらを再現する簡易形状として図1に示す2系統4種の3次元ブラフボディを主な検討対象とした。本報では、以降系統[1]を「後流構造モデル」、系統[2]を「ピラー渦モデル」と呼称する。

後流構造モデルとしては自動車空力研究でしばしば用いられる S.R. Ahmed (1984) による箱型鈍頭物体形状とし、後流構造が異なる背面傾斜角が i) 25° と ii) 35° の2種のモデルを設定した。以降、それぞれ「後曳き渦モデル」、「全体剥離モデル」と称する。

また、ピラー渦モデルはピラー曲率の組合せによって前後ピラーから発生する縦渦強度の組合せが異なり、i)リアピラー渦が強く後流の2次元性が高い(幅方向に速度変化が小さい)モデルと ii)ピラー渦が干渉し後流の3次元性の強いモデルを設定した。以降、それぞれ「リアピラー渦モデル」、「ピラー渦干渉モデル」と称する。

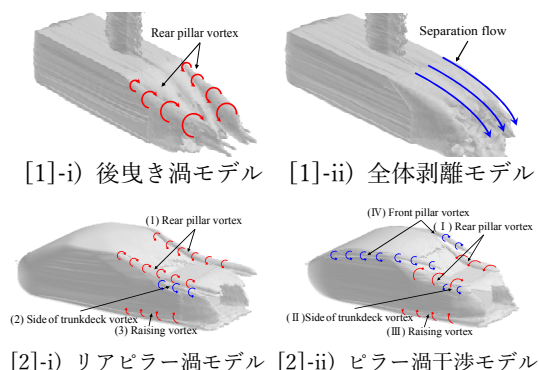


図1 対象3次元ブラフボディ (近傍渦度等値面とその渦回転方向を併記)

#### (2) 流体力計測・解析手法

##### ① 風洞試験法

風洞計測には、広島大学大学院工学研究科所有の船舶海洋風洞(ゲッチングン型、ノズル寸法2.0m角、計測部長さ4.0m)を用いた。試験装置の概要を図2に示す。

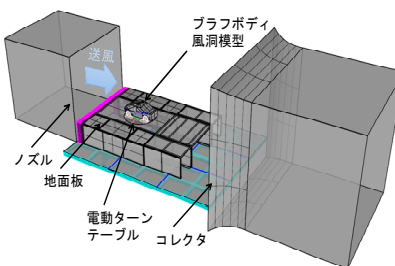


図2 風洞装置模式図

計測では地面板装置を用いて床面境界層の発達を抑制し、電動ターンテーブル機構により模型ヨー角を動的に制御した。試験では、主に3分力計（日章電機製 LMC-3501）を用いて空気力を計測した。

### ② 水槽試験法

水槽計測には、広島大学大学院工学研究科所有の曳航水槽試験装置を用いた。水深 1.1m に設置した昇降式可動床を地面に見立て、水面上方の曳航装置から水中に吊下げた模型を床上で曳航した。支柱は模型上面を貫通し、模型内部で防水型6分力計（日章電機製 LMC-6566A-WP）を介して模型を支持し、模型に作用する流体力のみを計測した。図3に試験装置の概要を示す。

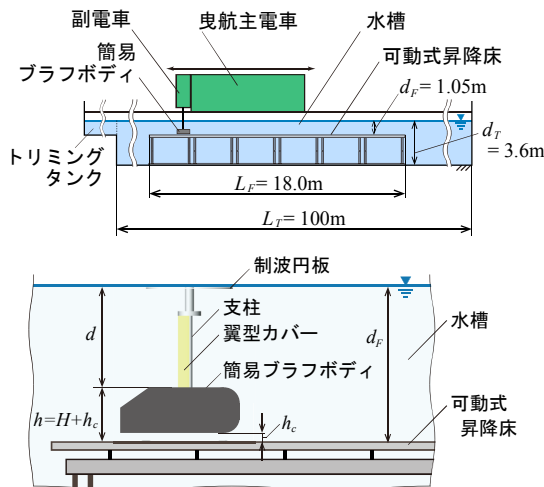


図3 曳航水槽試験装置

### ③ 数値解析法

解析には、節点中心型の非構造格子有限体積法による乱流解析ソフト FrontFlow/red を用いた。乱流モデリング手法には Large-Eddy Simulation (LES) 法を用い、SGS モデルには標準 Smagorinsky モデルまたはダイナミック Smagorinsky モデルを用いた。

ブラフボディ上の代表点（例えば重心点）を原点とする非回転の座標系で従属変数を定義し、非慣性系における Navier-Stokes 方程式を解くことでブラフボディの加減速を含む水平面内の並進運動を表現した。一方、ブラフボディの鉛直運動と回転運動については基礎方程式中で格子移動速度を考慮する ALE 法を用いて、解析格子の移動によって表現した。これらの組み合わせにより、並進と回転の両成分を伴う運動を再現し、過渡的に運動条件が変化するブラフボディ周りの流れ解析を行った。

#### (3) 座標系の定義

本研究では、図4のような座標系でブラフボディの進行運動を定義した。地上に固定された静止座標系である  $X-Y$  座標系に対して、ボディ前後軸を  $x$  軸とするボディ固定の  $x-y$  座標系を定義した。

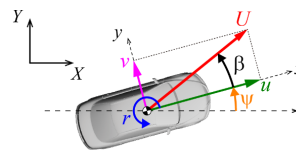


図4 座標系の定義

ここで、ボディの進行速度ベクトル  $U$  と  $x$  軸との成す角がすべり角  $\beta$  であり、ボディのヨー回転角速度  $r$  は静止座標系に対するヨー角  $\Psi$  の時間微分である。

#### (4) 対象条件

本研究では、突発的な外乱として想定される種々の条件でブラフボディに作用する過渡流体力特性と発生メカニズムを調査した。本報では、以下の3つの事象に対する調査について報告する。

##### ① 注目事象1：レーンチェンジ運動

非周期的な車両運動条件の代表例としてレーンチェンジ運動に注目し、同運動を模した軌跡を進行する条件を対象に流体力を計測する曳航水槽試験を行って、進行ブラフボディの空力応答を調査した。進行軌跡として、実車走行計測データにおけるヨー回転およびすべり角の時系列変化特性を参考に、図5に示すような運動を与えた。このとき、対象は後流構造モデルとした。また、併せて準定常的なヨー回転（定常円旋回）ならびに横すべり（斜め直進）を伴う進行運動時の定常流体力も計測し、過渡的なレーンチェンジ運動により発生する流体力と比較することで分析を加えた。なお、曳航速度と模型長さを基準とする Reynolds 数は  $6.8 \times 10^5$  である。

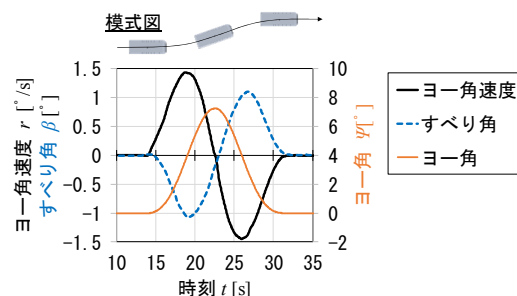
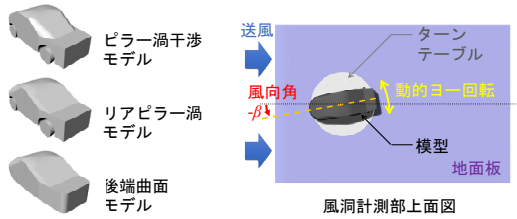


図5 レーンチェンジ運動条件

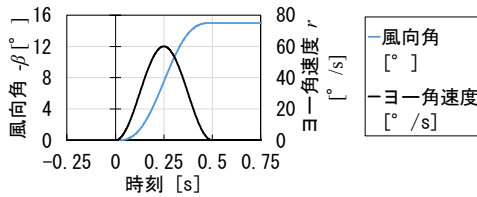
##### ② 注目事象2：突発的相対風向変化

大気風向変化やボディの非定常運動に伴い相対風向が非周期的に変化する際の空力応答に注目し、風洞装置の電動ターンテーブルを用いて一様流中で模型をヨー回転させ、相対風向が過渡的に変化する風洞試験を実施した。対象はピラー渦モデルとし、疑似タイヤを付加した模型を用いた。また、ピラー渦干渉によるボディ周り流れの差異の影響に加えて、局所形状の影響にも注目することとし、モデル後端の側方角部を曲面としたモデル（疑似タイヤ無し）も対象として試験を行った。計測部風速と模型長さを基準とする Reynolds 数は  $1.3 \times 10^6$  である。

ヨー角の変化条件として $0^\circ$  から $15^\circ$  への過渡的な変化を与え、変化に要する時間を0.5, 1.0, 2.0 秒の3条件とした。試験の概要とヨー角の時系列変化を図6に示す。



(a) 風洞試験模型と計測概要



(b) 過渡ヨー角条件

図6 過渡ヨー角試験の概要

### ③ 注目事象3：ピッチ自由振動

路面凹凸等の突発的外乱による過渡空力応答を検討するため、ピッチ変位が生じた状態から自由減衰振動するブラフボディの流体-剛体運動連成現象の数値解析を実施した。これにより、過渡空力特性に加えて、その空気がブラフボディの運動に与える影響についても検討した。対象はピラー渦モデルとし、仮想前輪軸位置を回転中心として後輪軸位置に自動車のサスペンションとダンパーをスケールしたばねと減衰を考慮した。剛体運動系の模式図を図7に示す。

解析では、空気力入力が無い状態からピッチ角変位 $2.0^\circ$ を初期条件として与え、その後の自由減衰振動を剛体運動と作用空気力の強連成解析により予測した。乗用車の1/20スケール風洞模型相当の条件とし、車長を基準とする Reynolds 数は $2.3 \times 10^5$ とした。

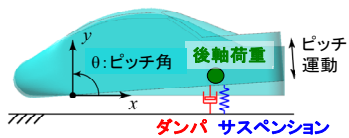


図7 ピッチ自由減衰振動モデル

## 4. 研究成果

### (1) 微係数法に基づく空力分析手法の検討

個別事象の分析にあたり、ブラフボディの非定常運動や外乱に伴う空気力応答を分析するための手法として、ボディの進行角度や回転角速度、さらにはそれらの時間変化に対して発生する空気力の応答を線形重ね合わせで表現する手法を採用した。例えば、ヨー回転運動と横すべり運動を伴う車両運動によって発生する横力係数 $C_s$ とヨーモーメン

ト係数 $C_{YM}$ について、ヨー回転角速度 $r$ と車両横方向速度 $v$ およびそれらの時間微分 $\dot{r}, \dot{v}$ に対する応答をそれぞれ線形近似し、その和をとることで以下のように近似表現する。

$$C_s(r', \dot{r}', v', \dot{v}') \cong \frac{\partial C_s}{\partial r'} r' + \frac{\partial C_s}{\partial \dot{r}'} \dot{r}' + \frac{\partial C_s}{\partial v'} v' + \frac{\partial C_s}{\partial \dot{v}'} \dot{v}' + C_{s,0}$$

$$C_{YM}(r', \dot{r}', v', \dot{v}') \cong \frac{\partial C_{YM}}{\partial r'} r' + \frac{\partial C_{YM}}{\partial \dot{r}'} \dot{r}' + \frac{\partial C_{YM}}{\partial v'} v' + \frac{\partial C_{YM}}{\partial \dot{v}'} \dot{v}' + C_{YM,0}$$

式中の各線形微係数については、船舶運動力学における流体力モデル同定手法を参考に、注目する運動パラメータ（上式の例では $r, v$ 等）のうち単一もしくは少数のパラメータのみ変化させた運動条件において実験計測や数値解析を行い、その微係数を決定した。

### (2) レーンチェンジ運動時の空力応答

本項では、1つ目の注目事象であるレーンチェンジ運動時の空力応答について調査した結果を示す。

まず、準定常的なヨー回転および横すべり運動に伴う横力係数 $C_s$ とヨーモーメント係数 $C_{YM}$ の変化の数値解析結果を図8に示す。横滑り運動に対して、横力係数 $C_s$ の応答は全体剥離モデルが大きく、ヨーモーメント係数 $C_{YM}$ の応答は後曳き渦モデル大きい。また、ヨー回転運動に対しては横力、ヨーモーメントともに全体剥離モデルの応答が大きい。これらは、主に相対風向の変化に対する後流構造の応答差によるもので、後部傾斜面側方の圧力変化が異なるためであることが、解析結果の可視化から確認された。

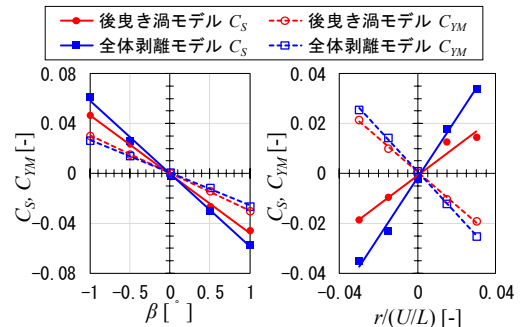


図8 後流構造モデルの準定常空力応答 (左：横すべり応答、右：ヨー回転応答)

続いて、図9に曳航水槽試験で計測されたレーンチェンジ運動時に生じる横力とヨーモーメントの時系列変化を示す。図中には前4.(1)項で述べた線形微係数近似により準定常特性から予測される両空力係数も示した。その結果、全体剥離モデルの横力係数において、準定常評価に対して変化のタイミングが遅れる過渡影響が確認された。また、ヨーモーメントにおいては、両モデル共に旋回方向が切り替わるタイミングで準定常評価に対する遅れが確認された。このことから、過渡的な流体力の発生に加え、ボディ周り流れ構造の差異がその過渡特有の流体力に対して

差異を生じることが確認された。この過渡空力応答の差異は、準定常応答の差異の要因となった後部傾斜面側方の圧力応答を生じる流れ構造の応答の差異が、過渡的にも異なる振舞をするためと推測された。

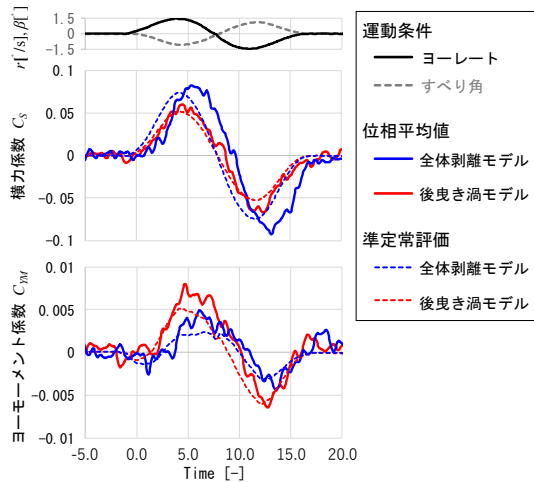


図9 レーンチェンジ運動に伴う流体力 (曳航水槽試験結果)

### (3) 相対風向変化時の空力応答特性

本項では、相対風向が過渡変化した際の空力応答特性に関する検討について述べる。

まず、準定常ヨー角条件に対する空力応答について、対象モデル (図6) のヨーモーメント特性を図10に示す。ヨー角変化に対するヨーモーメント応答はピラー渦干渉モデルの方が大きい。数値解析による検討から、この差異は前項で述べた後流構造モデルと類似な現象によるものであり、相対風向の変化に対するトランクデッキ側端の縦渦に関連する流れの応答の差異が影響している。また、後端形状を曲面としたモデルでは、風向角が  $10^\circ$  から  $15^\circ$  にかけて風向角に対する  $C_{YM}$  の変化の勾配が小さくなっており、他のモデルと比べて強い非線形性が確認できる。

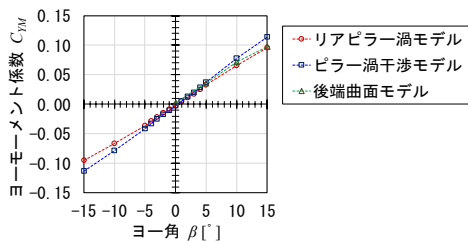


図10 ピラー渦モデルのヨー角応答特性 (大気風影響を想定した広ヨー角範囲)

続いて、図11に過渡条件での計測結果として風向角を動的に  $0^\circ$  から  $15^\circ$  まで変化させた際の  $C_{YM}$  の時間変化を示す。ここでは、ヨー角変化の所要時間は最も短い 0.5 秒間 (無次元時間で 13) の結果を示した。グラフより、ピラー渦干渉が異なる2モデルともに過渡的な空力特性の変化は観測されていないことが分かる。一方、モデル後端の側方角部を曲面とした後端曲面モデルに対して同

様の計測を行ったところ、図12に示すような  $C_{YM}$  のオーバーシュートと風向角変化後1秒程度 (無次元時間で 25) に及ぶ履歴影響が確認された。

図10で示したように、後端曲面モデルは風向角  $10^\circ$  から  $15^\circ$  の間で空力係数が風向角に対して非線形な変化を示しており、これは後端曲面上の流れの剥離特性が、翼の失速現象のようにヨー角変化に対して不連続的に発生するためと考えられた。過渡条件における長時間に渡る履歴影響は、このようなボディ周り流れ特性の不連続的な変化が時間を要するために生じたものと推測された。

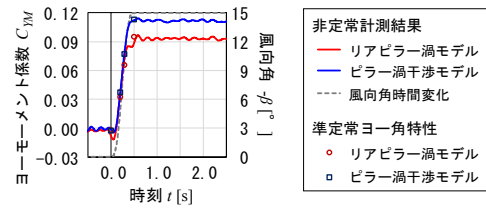


図11 動的ヨー角変化に対する応答比較

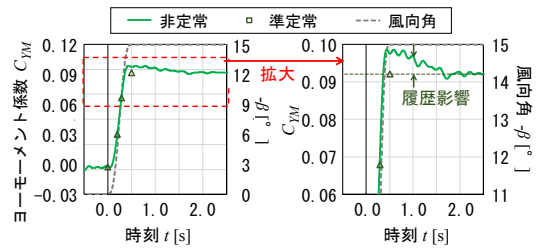


図12 後端曲面モデルのヨー角変化時の過渡空力特性

### (4) ピッチ自由減衰運動への過渡空力影響

本項では、突発的に生じたピッチ変位からの自由減衰振動に対する数値解析の結果を示し、過渡空気力特性が自動車のような実用的ブラフボディの運動に与える影響についての検討結果を示す。

まず、図13にピラー渦モデルの準定常的なピッチ角変化に対する空力応答を示す。両モデルとも、ピッチ角が付くにつれてその姿勢変化を増大させる向きの正のピッチモーメントが増加する傾向を示している。これは、ピラー渦干渉モデルではピッチ角が付いた際にピラー渦同士が接近し、その干渉影響が増大するためであった。また、モデル間ではピラー渦干渉モデルの方がその傾向が強く、ピッチモーメントの増加量が多い。ただし、基準姿勢におけるピッチモーメントについては、リアピラー渦モデルの方が大きい。

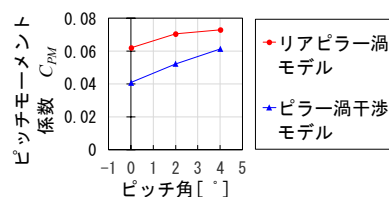


図13 ピッチ角に対する準定常応答

続いて、図 14 に自由減衰振動時の空力と剛体運動の連成解析結果としてピッチ角の時系列変化を示す。空気力を考慮していない剛体運動に対して、両モデルの過渡空気力を考慮したケースではいずれも運動が変化し、自動車の過渡的運動に対して空気力が影響を与えることが示された。さらに、ピラー渦干渉の有無によるトランクデッキ上方からボディ後流にかけての流れ構造の差異で、運動に異なる影響を生じることが確認された。

しかし、準定常特性の評価で示したピッチ角に対する負のバネの効果は、ピラー渦干渉モデルの方が大きい。また、ピラー渦干渉モデルの方が空気力による減衰の効果が小さいことも確認されている。これらの特性と本解析結果との整合については、更なる検証が必要である。

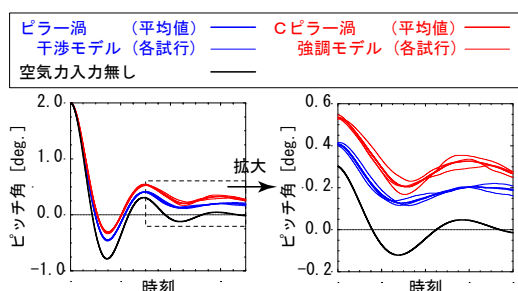


図 14 自由振動時のピッチ角変化の比較

#### (5) 各事象に対する調査結果のまとめ

以上の過渡的的空力応答に関する複数の検討から、以下の事を明らかにした。

- ・ ボディ周りの代表的流れ構造が異なることで、準定常的な空力応答に加えて過渡的な空力応答も異なることを示した。
- ・ 流れの特性時間と比べて長い時間に渡る履歴影響が生じ得ることを示した。ボディ周囲の流れ構造が不連続に変化する流れ構造と条件変化の組合せで生じることから、履歴効果の発生メカニズムとして流れ構造変化の時間遅れを指摘した。
- ・ 空力と剛体運動の連成解析により、流れ構造の差異が生む過渡的な空力特性差が進行ブラフボディの実用運動特性に影響し得ることを示し、その重要性を示した。

#### 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 4 件)

1. Ryosuke Kono, Takuji Nakashima, Makoto Tsubokura, Yoshihiro Okada, Takahide Nouzawa, "Aerodynamics Simulation of a Sedan-Type Road Vehicle in Cornering Motion with Roll Angle," Proceedings of 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference, 査読無, 巻無し, 2016, AIAA 2016-3726, doi:10.2514/6.2016-3726
2. Takuji Nakashima, Yousuke Morikawa,

Makoto Tsubokura, Yoshihiro Okada, and Takahide Nouzawa, "Unsteady Aerodynamics Simulations of a Sedan-Type Road Vehicle during Sinusoidal Steering Input," Proceedings of 33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference, 査読無, 巻無し, 2015, AIAA 2015-3307, doi:10.2514/6.2015-3307.

3. Takuji Nakashima, Makoto Tsubokura, Yoshihiro Okada, Takahide Nouzawa, Ryosuke Kono and Yasuaki Doi, "Aerodynamic characteristics of a road vehicle in steady-state cornering," Proceedings of ASME-JSME-KSME Joint Fluid Engineering Conference 2015, 査読無, 巻無し, 2015, AJKFluids2015-17553, doi:10.1115/AJKFluids2015-17553.

4. 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, Vol. 80, 査読有, 2014, No. 818 p. FE0301, doi:10.1299/transjsme.2014fe0301.

〔学会発表〕(計 5 件)

1. 中島 卓司, ロール姿勢変化を考慮した操舵走行する乗用車の非常空力シミュレーション, 第 22 回計算工学講演会, 2017 年 5 月 31 日-6 月 2 日, 埼玉県さいたま市.
2. Takuji Nakashima, Towing-tank measurement for the transient aerodynamics of road vehicles in real-world motion, Tagung: Fahrzeug- Aerodynamik - Neue Chancen und Perspektiven für die Kraftfahrzeugaerodynamik durch CO2-Gesetzgebung und Energiewende, 5-6 Jul 2016, Munich, Germany.
3. Ryosuke Kono, Aerodynamics Simulation of a Sedan-Type Road Vehicle in Cornering Motion with Roll Angle, 34th AIAA Applied Aerodynamics Conference
4. Yousuke Morikawa, Unsteady Aerodynamics Simulations of a Sedan-Type Road Vehicle during Sinusoidal Steering Input 2015, 33rd AIAA Applied Aerodynamics Conference, 22-26 Jun 2015, Dallas, TX, USA.
5. Kono Ryosuke, Aerodynamic characteristics of a road vehicle in steady-state cornering 2015, ASME-JSME-KSME Joint Fluid Engineering Conference 2015, 26-31 Jul 2015, Seoul, Korea.

#### 6. 研究組織

(1) 研究代表者

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: 4 0 4 4 4 7 0 7