

## 地面効果を受ける加振翼の非定常空力とその発生メカニズムについて

### Unsteady Aerodynamics of Oscillating Airfoil in Ground Effect and its generation mechanism

- TAN TAO, 北大院, 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目, E-mail: tantao@eis.hokudai.ac.jp  
 大島 伸行, 北大院, 060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目, E-mail: oshima@eng.hokudai.ac.jp  
 坪倉 誠, 神戸大院, 657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1, E-mail: tsubo@tiger.kobe-u.ac.jp  
 Tao Tan, Hokkaido Univ., Kita-13, Nishi-8, Kita-Ku, Sapporo 060-8628  
 Nobuyuki Oshima, Hokkaido Univ., Kita-13, Nishi-8, Kita-Ku, Sapporo 060-8628  
 Makoto Tsubokura, Kobe Univ., 1-1, Rokkodai-Cho, Nada-Ku, Kobe-Shi, Hyogo 657-8501

In this study, Large-Eddy Simulation on a wing out of ground effect (OFG) is conducted to compare with a wing under the ground effect (WIG) to clarify the feature of turbulent transition and separation at Reynolds number 1,300,000. The difference between OFG and WIG in the flow field and pressure coefficient on wing lower surface is investigated. The Calculation method is validated by a comparison with the result of wind tunnel measurement. The numerical results agree with the experimental results in terms of pressure coefficient on wing lower surface. Visualizing the flow fields around wing of the numerical results, in the case of a heaving airfoil out of ground effect, there is no variation in the flow field and pressure distribution. In the case of WIG, transition structures and the turbulent separation are observed. The position of turbulent transition and the status of air stagnating vary with the ground clearance.

#### 1. 緒言

1992年に始まった気候変動枠組条約によって、CO<sub>2</sub>排出量が日本全国の2割を占める運輸部門において、自動車の燃費改善が重要な課題になっている。これに伴い、車両空気学分野では、車体の空気抵抗係数  $C_d$  の低減が課題である。例えば、Buchheimら[1]の研究によって、床下形状の平坦化が15%の  $CD$  低減をもたらすことが明らかになった。

また、高速の流体機器周りの流れは、 $Re$  が  $10^6$  を超える高レイノルズ数での流れがほとんどであり、流れも層流状態で剥離するのではなく乱流状態で剥離する[2][3]。高レイノルズ数になると、曲面などで剥離した流れが壁面上に再付着し、剥離泡を形成する場合がある、この剥離泡は流れの非定常性を生む原因となり、揚力などの空力特性に影響を与えることが広く知られている[4]。

それに加えて、地面効果を受ける領域において、地面高さの変化に伴う地面効果の変化により、車両床下の流れ場が複雑になり、床下に加える空気力の予測が難しくなる。このような背景により、自動車の高速化や高性能化に伴い、走行安定性の重要性が高まる中、車両床下の流れ場と働く空気力の予測が不可欠になっている。

したがって、本研究の目的は、自動車を簡略化した翼形状を用いて、地面効果を受ける振動翼のケース (WIG) と地面効果がないケース (OFG) を比べ、地上高変化による非定常空力現象のメカニズムを Large-Eddy Simulation により解明することである。本研究では翼の変位による翼端渦の変化に対する議論を避けるため翼の両端を側面境界に接続する2次元翼を用いるが、妥当性検証のため同じ翼表面解像度をもつ3次元翼により風洞実験結果との比較検討を行う。

#### 2. 解析手法

本研究で用いた非圧縮性流れを対象とした LES の基礎方程式は、次に示す空間フィルタにより粗視化した連続の式、および Navier-Stokes 方程式である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\bar{u}_i \bar{u}_j) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + 2 \frac{\partial}{\partial x_j} (v + v_{SGS}) \bar{S}_{ij} \quad (2)$$

ここで、式中の添字  $i, j$  は方向を表し、上付き線は格子スケールによる空間フィルタ操作を表す。本解析ではサブグリッドスケール (Subgrid-Scale, 以下 SGS) モデルとして、Smagorinsky によるモデルを適用した。ここで、SGS 動粘性係数  $v_{SGS}$  は、式 (3) のように定義されている。

$$v_{SGS} = (C_{SGS} f \Delta)^2 \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \quad (3)$$

モデル係数  $C_{SGS}$  は動的スマゴリンスキーモデルを使い、GS 成分の状態に応じて各時間、各場所の変数として求める。 $f$  は Van Driest の減衰関数と呼ばれ以下に示す。壁近傍で SGS 動粘性係数  $v_{SGS}$  をゼロに漸近させるため導入される。

$$f = 1 - \exp\left(\frac{-y^+}{26}\right) \quad (4)$$

このとき圧力  $\bar{P}$  は以下のように定義されている。

$$\bar{P} = \frac{\bar{p}}{\rho} + \frac{1}{3} (\bar{u}_i \bar{u}_i - \bar{u}_i \bar{u}_i) \quad (5)$$

本研究では空間離散化手法として非構造格子に基づく有限体積法を用いた。対流項および粘性項の空間離散化には2次精度中心差分法を用いた。ただし、対流項には2次精度中心差分法に1次精度風上差分法を5%ブレンドしたスキームを用いているほか、格子の粗い遠方については1次精度風上差分法を用いている。時間積分法として1次精度 Euler 陰解法を用いた。速度と圧力のカップリングには SMAC 法を用いた。翼の上下への変位には、オイラー方法による数値解析において格子の変位に対してラグランジュ方法で扱う境界移動法を Arbitrary Lagrangian Eulerian (ALE) 法を用いている。本研究は数値解析ソフトウェアとして FrontFlow/red-Aero-HPC を用いた。

### 3. 計算モデルと解析領域および境界条件

本研究で用いた解析対象を図1に示す。車両床下形状を翼形状にモデル化した2次元翼である。翼前後長を基準長さ  $c$  として、 $0.25c$  のスパン長を解析した。翼下面形状は床下形状を模擬した平坦な前半部分と乱流遷移を発生するキャンパー部分を経て跳ね上げられた後半部分を持つ。地面効果を受ける翼下面流れを議論するため上面は下面の流れ場への影響を抑えた形状とした。具体的には翼前端および後端から水平面を延ばし、高さの違いを曲率の大きい二つのカーブでつないだ。

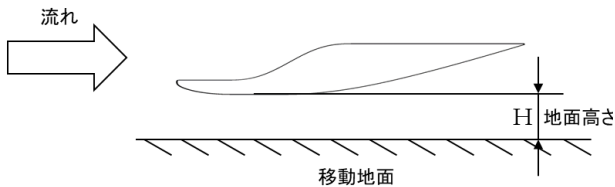


Fig.1 Centre-line section view.

計算領域は翼前後長を基準長さ  $c$  として、翼前方に  $7c$ 、後方に  $15c$ 、高さは  $6.79c$  である。スパン方向は  $0.25c$  とした。翼近傍のメッシュは、図2のように配置している。

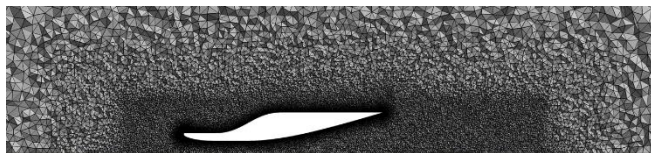


Fig.2 Sideview of computational domain

翼表面には境界層の速度勾配と剥離を捉えるためプリズム層を設けた。乱流遷移を捉えるため翼下面の  $y^+$  は1以下を確保した。各部の解像度を表1に示す。

Table.1 Mesh resolutions around the airfoil.

|                    | Resolution | $y^+$         |
|--------------------|------------|---------------|
| Leading edge [mm]  | 0.15mm     | $\approx 1.2$ |
| Trailing edge [mm] | 0.5mm      | $< 1$         |
| Upper surface [mm] | 1.0mm      | $< 1$         |
| Lower surface [mm] | 0.5mm      | $< 1$         |

総要素数は約2,500万要素、計算領域断面積に対する翼のプロジェクティビリティ・レシオは約2.13%、およびレイノルズ数は翼前後長を代表長さとして  $Re = 1,300,000$  である。

計算条件について、流入速度は  $44.444 \text{ m/s}$  ( $160 \text{ km/h}$ )、両側壁および天井は自由滑り条件を与えた。比較対象とする風洞実験では、ムービングベルトを用いて、地面に発達する境界層影響を排除した。そこで、本解析では主流と同じ流速を床面に与えた。本研究ではALE法による境界移動により、地面効果がある所と地面効果がない所で、翼をヒービング運動(振幅  $A: 6\text{mm}$ 、周波数  $f: 5\text{Hz}$ )させた。

### 4. 数値解析手法の検証

数値解析手法の妥当性検証のため、同じ翼表面解像度をもつ風洞実験装置と同じ形状の3次元翼形状格子を用いて解析し、風洞実験結果との比較検討を行う。境界条件について、翼前後の間隔は2次元翼形状での解析と同様であり、幅方向のみ翼と側壁面と

の間隔を  $10.18c$  と広く設け、計算格子の総要素数は約1億8000万である。数値解析手法の検証で用いた解析領域の概略図を図3に示す。

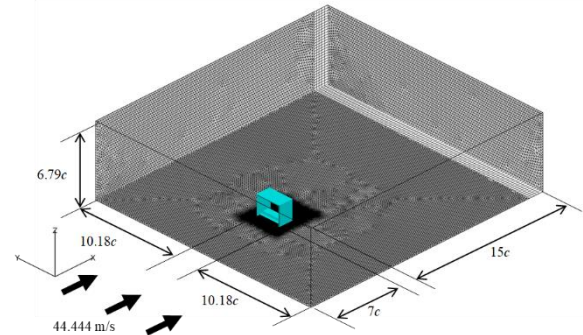


Fig.3 Schematic view of computational domain

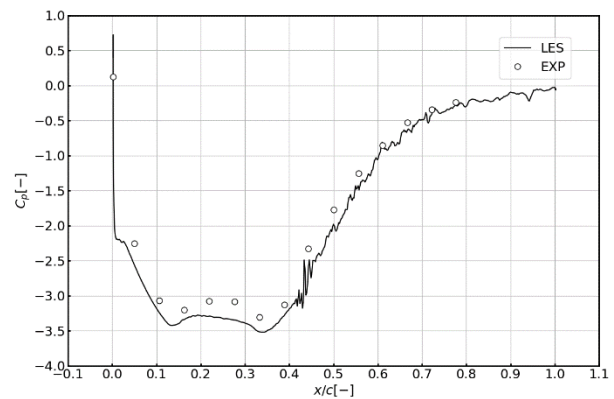


Fig.4 Pressure distribution on lower surface by LES and experiment

図4に翼下の圧力分布について実験とLESの比較を示している。全体を見ると、数値解析が圧力を過大評価している。これは、翼端板下からの空気流入を少なく見積もることに起因すると考える。 $x/c = 0.1$  附近の地面効果による  $Cp$  値のピークと  $x/c = 0.4 \sim 0.5$  に乱流遷移現象が捉え、翼下の各部分の圧力分布の変化が実験結果に概ね良好な一致をしている。以上より、本解析手法では圧力の大きさが過大評価されたが、翼下の流れ構造と非定常空気力の変動に十分な精度を有していると考えられている。

### 5. 解析結果および考察

図7,8に地面効果ないケース(OFG)において、ヒービング運動する時、各変位  $h^* = -1.0, -0.5, 0.0, 0.5, 1.0$  (ヒービング中心:  $h^* = 0.0$ ) の速度場と圧力分布を示す。変位の変化にかかわらず、速度場と圧力分布がほぼ一致することがわかった。図10にOFGの揚力係数(赤線)と変位(黒線)の時間履歴を示す。上昇および下降時で相対迎角の変化に応じて、揚力が変化していることが分かった。

図5,6に地面効果があるケース(WIG)の各変位の速度場と圧力分布を示す。図7と比べると、地面効果による翼下に乱流剥離現象が発生することを確認し、高さの変化による翼後方の剥離領域の大きさもことが分かった。図9に示すWIGの揚力係数の時間履歴は、図10に示すOFGの揚力係数の時間履歴と逆になっていることが分かった。これは、図6に示す地面高さの変化による翼先端の加速状態の変化と翼後方の乱流遷移が発生する場所の変化に起因すると考えられる。

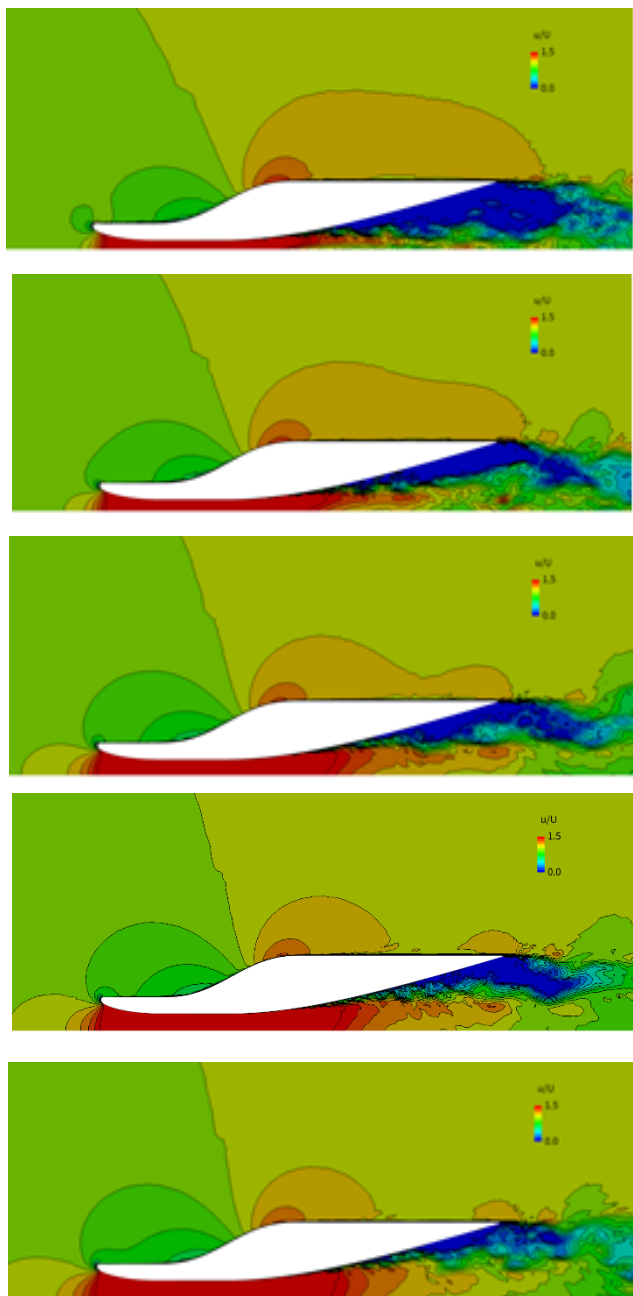


Fig.5 Instantaneous velocity at  $h^* = -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0$  (WIG)

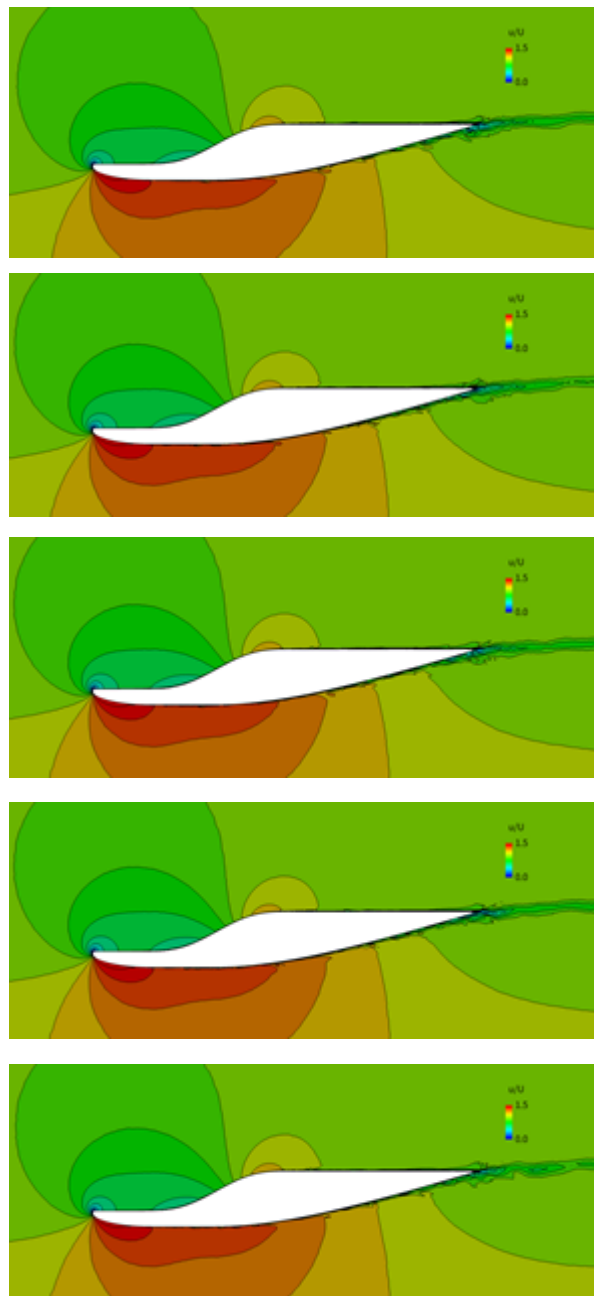


Fig7. Instantaneous velocity at  $h^* = -1.0, -0.5, 0, 0.5, 1.0$  (OFG)

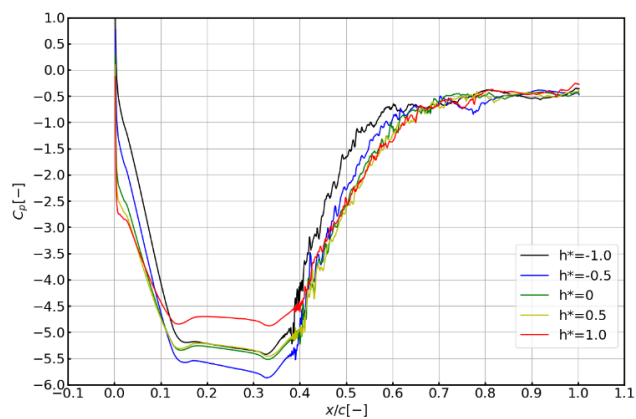


Fig.6 Pressure distribution of the lower surface (WIG)

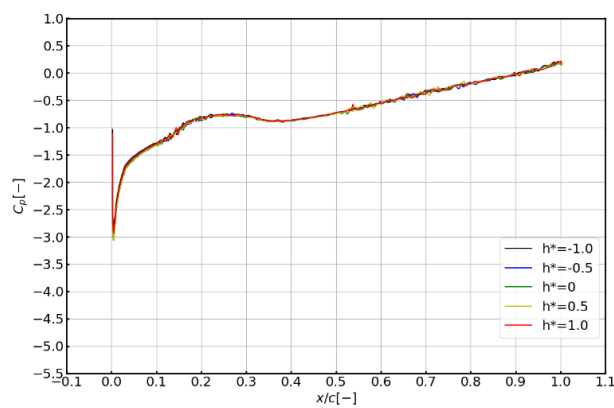


Fig.8 Pressure distribution of the lower surface (OFG)

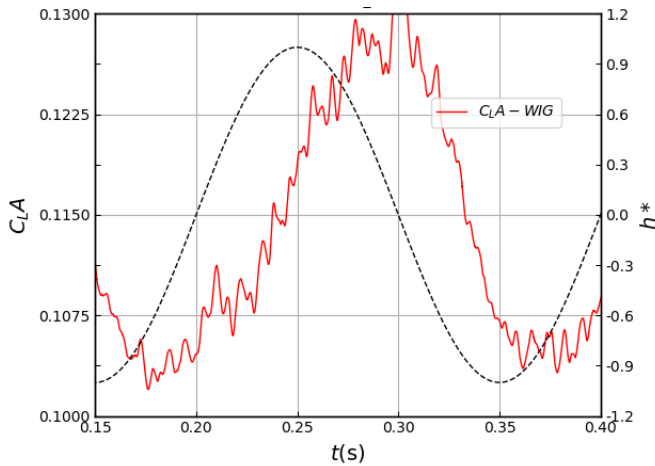


Fig.9 Time history of the lift coefficient for a heaving airfoil (WIG)

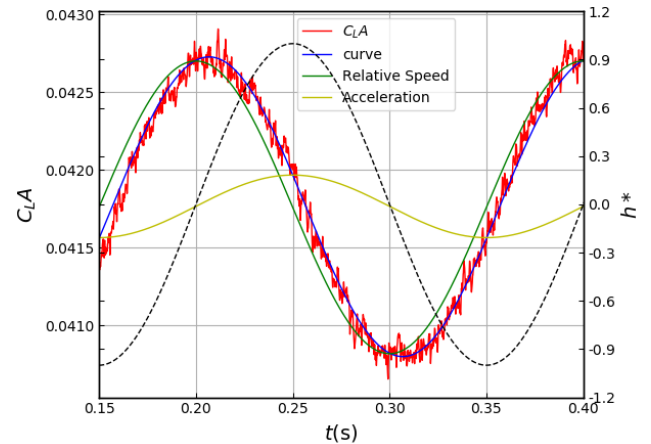


Fig.12 Curve fitting of lift coefficient (OFG)

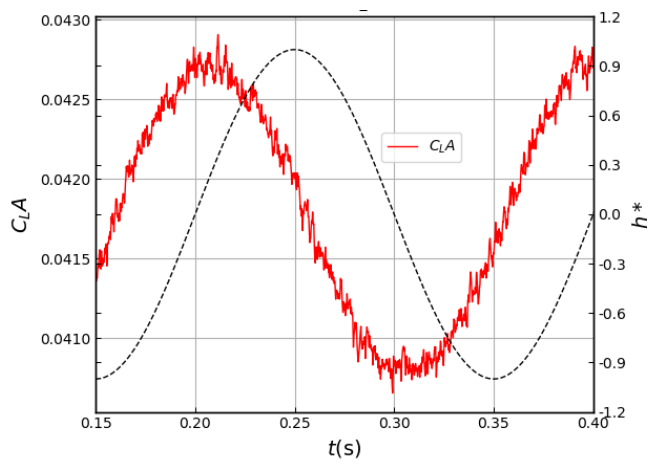


Fig.10 Time history of the lift coefficient for a heaving airfoil (OFG)

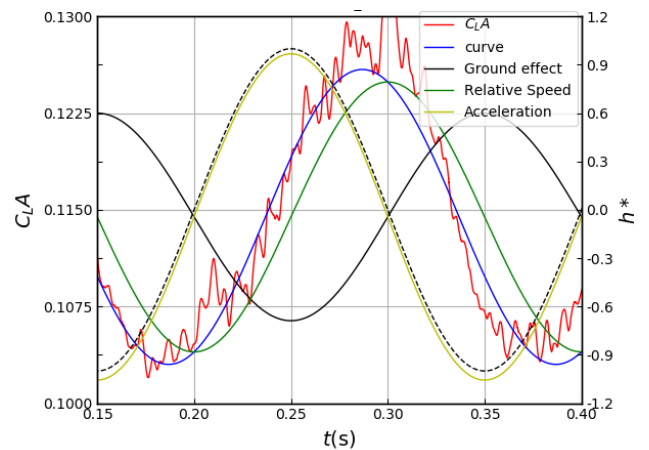


Fig.11 Curve fitting of lift coefficient (WIG)

佐藤ら[5]は運動に伴う車両に働く空気力変化の理解を目的として、ALE法による境界移動を適用し、LES解析を行った。研究では模型の変位に依存する縮流、相対流入角変化、付加質量の各作用に対する成分として変位項  $C_1$ 、速度項  $C_2$ 、加速度項  $C_3$  を非定常空気モデルに与え、空気力の周波数特性を表現できることを示した(式(6))。

$$C'_p = C_1 \Delta z + C_2 \frac{dz}{dt} + C_3 \frac{d^2z}{dt^2} \quad (6)$$

ここで、 $C_1$  は静的に高さを変化させたときの圧力変化率であり、式(4.1)のカーブフィッティングを行って  $C_2$ 、 $C_3$  を求めた。WIGにおける  $C_1 = 0.00805$ ,  $C_2 = -3.333 \times 10^{-4}$ ,  $C_3 = -1.282 \times 10^{-5}$ , OFGにおける  $C_1 = 0.0$ ,  $C_2 = 2.999 \times 10^{-5}$ ,  $C_3 = -2.074 \times 10^{-7}$  である。赤線が実際の計算データ、青線が近似曲線、グリーン線が相対迎角の変化、黄色線が付加質量を表す。各成分の寄与は、図11、12に示し、近似曲線(青線)が非定常空気力の特徴をよく捉えていると考える。図11と図12を比べると、WIGにおける付加質量の寄与が大きくなるのが明らかになる。それに加えて、OFGにおいて若干遅れる相対迎角の項が、WIGの場合では若干早くなっている。

## 6. 結論

- (1) Large-Eddy Simulation を使い、WIG ケースにおいて、異なる地面高さによる地面効果の変化の影響で、翼後方の乱流剥離と翼先端の加速状態の変化により、流れ場や揚力係数の時間変化が OFG と異なる。
- (2) OFG においてヒービング運動する翼の揚力変化は、運動による相対迎角の変化に起因するが、WIG においては、地面高さの動的変化による地面効果の変化が主な原因になる。
- (3) OFG と比べ、WIG における付加質量項が、振動翼の非定常空気力に大きく影響する。

## 参考文献

- (1) Buchheim, R., Leie, B. and Lueckhoff, H.-J., "Der neue Audi 100 - Ein Beispiel fuer konsequente aerodynamische Personenwagen-Entwicklung"
- (2) 佐藤, 浅田, 野々村, 河合, 青野, 焼野, 藤井 "レイノルズ数 1,600,000 における翼周りの LES: 乱流剥離とその制御" 第 27 回数値流体力学シンポジウム, A05-2 (2013).
- (3) (12) Simpson, R. L., "Turbulent boundary-layer separation", Annual Review of Fluid Mechanics, 21 (1989), pp. 205-234.
- (4) 野々村, 小嶋, 安養寺, 大山, 藤井, "LES による石井翼 ( $Re=23,000$ ) の空力特性評価", 第 43 回流体力学講演会/航空宇宙

数値シミュレーション技術シンポジウム 2011 論文集.

- (5) 佐藤範和, 河上充佳, 加藤由博, 稲垣昌英, 堀之内成明, “ALE 手法を用いた運動する車両周りの非圧縮性 LES 解析 : 第 3 報, 上下運動する簡易車両模型の非定常空力解析,” 日本機械学会論文集(B 編), vol. 76, 2010, pp. 1515-1524.