

数値シミュレーションを用いた回転円盤上を走行する エアロトレイン翼の空力特性解析

原 正志^{a)}・菊地 正憲^{b)}

Analysis of Aerodynamic Characteristics of Aerotrain Wing running on the Rotating Disk using a Numerical Simulation

Masashi HARA, Masanori KIKUCHI

Abstract

Researches of “Aerotrain” using natural energy resources have been conducted in this decade. The Aerotrain has wings and flies close to the U shaped guide way to use the ground effect of the wings. The wing has high lift/drag coefficient but interferes with the ground through the fluid viscosity. Experiments of aerodynamic characteristics of the wing have to be made in a towing wing tunnel, because it moves relative to the ground. So far, the rotating disc apparatus was developed in order to make a towing wing experiment, and the aerodynamic characteristics, such as lift coefficient was examined. But it was limited to the main wing without a side wing nor a side wall. In this paper, it was made numerical simulations of the flow past the main wing with side wing running close to the ground and the side wall. The aerodynamic characteristics were elucidated and the behavior of the flow around the side wall was made clear. The results of lift coefficient of the main-side wing obtained by experiment and numerical analysis were compared, and the usefulness of the rotating disc was examined.

Keywords: Numerical Simulation, Aerotrain, Rotating Disk, Wing in Ground Effect.

1. 諸言

1.1 研究背景

我々の日々の生活や企業の生産活動など、エネルギーの消費は必要不可欠である。2011年3月11日に発生した東日本大震災により、福島第一原発が被災したことから原子力発電の自然災害に対する脆さが露呈しエネルギー供給体制が見直され、現在はほぼ火力発電に依存している。火力発電は、排気ガスによる大気汚染や化石燃料の消費による資源問題、燃焼による二酸化炭素排出量増加に伴う地球温暖化問題、化石燃料依存によるエネルギー安全保障問題など、様々な問題が山積しているのが現状である。そのため、わが国では脱火力・脱原子力の風潮が高まってきており、太陽光や風力をはじめとする再生可能エネルギーが改めて注目されている。

現在、ハイブリッドカーなどの普及により再生可能エネルギーはより身近のものとなり環境親和型社会が形成されつつある。一方で、高速鉄道などの大型運輸部門は依然として化石燃料に大きく依存しており、二酸化炭素排出量が大きい環境負荷も高くなっている。そのため、この大型運輸部門のエネルギー源を自然エネルギーへ代替することにより、さらなる環境負荷低減が期待されている。

a)機械システム工学専攻大学院生

b)機械設計システム工学科教授

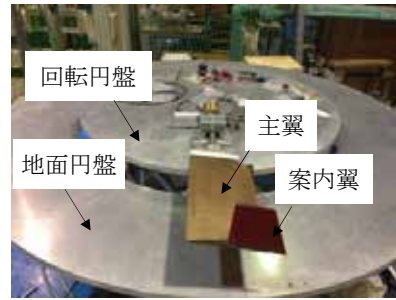
ここ10数年の間、推進効率が高く環境負荷の少ない新交通輸送システム「エアロトレイン」に関する研究が行われている。エアロトレインは、胴体に取り付けられた主翼の地面効果を利用し、地面からわずかに浮上し凹型のガイドウェイ内を走行する。この地面効果とは翼と地面との間に発生するラム圧の増加により揚力が増加し、地面により翼端渦が抑制されることにより誘導抗力が減少することで揚抗比が増加する現象である。そのため、軌道敷地内に設置してあるソーラーパネルや風力発電装置から得られるエネルギー密度の小さい自然エネルギーのみでの走行ができ、大幅なエネルギーの節約ができると期待されている。

エアロトレインの高効率走行には揚抗比が重要なパラメータとなる。揚抗比は地面効果により大きくなり、地面高さや迎角などのパラメータによりその特性は大きく変化する。また、地面近傍で走行する際に翼と地面が空気の粘性で強く干渉するため、翼の空力特性を実験的に求めるには、翼を地面に対し走行させる必要がある。そのため、本研究室では回転円盤走行装置を用いてエアロトレイン翼の揚抗比の測定を行ってきた。この回転円盤走行装置は、実験室内という限られたスペースで翼を曳航方式で走行試験を行えるという利点がある。しかし、実際のエアロトレインは直線走行となるため、本研究室の行っている回転走行との対応関係の調査、および、回転円盤走行装置の有用性を調べる必要がある。

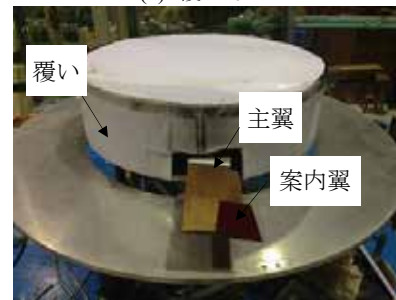
1.2 研究目的

エアロトレインは凹型のガイドウェイ内を走行し、主翼両端に取り付けられた案内翼により側壁と非接触で走行する。これまで本研究室が行ってきた回転円盤走行装置を用いた翼の走行試験では、側壁及び案内翼が取り付けられておらず、また、翼に働く揚力、抗力を検討するのみに留まっていた。また、エアロトレインが直線走行を行うのに対し、回転円盤走行装置での実験は回転走行となりその対応関係が未解明であった。

実験では揚力と抗力しか測定することができず、翼表面上の圧力分布や速度ベクトルなどの詳細なメカニズムを解明するためには実験だけでは限界がある。そこで、本研究では数値シミュレーションを用いて、回転走行する翼周りの圧力や速度分布の状況と回転走行におけるエアロトレイン翼の空力特性の解明を目的とする。また、数値シミュレーションにより得られた解析結果が妥当な結果となっているかを、実験で得られた結果と比較を行うことで数値シミュレーションの妥当性を検討する。



(a) 覆いなし



(b) 覆いあり

図1 回転円盤走行装置.

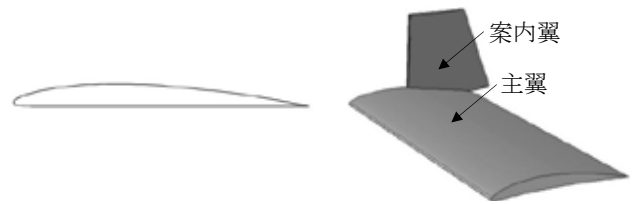
2. 解析方法及び解析条件

2.1 解析方法

本研究では解析に ANSYS 社製の有限体積法汎用熱流体解析ソフトウェア FLUENT を用いた。解析領域のモデル化とメッシュ作成には GAMBIT と TGrid を使用した。FLUENT では、質量保存則は連続の式、運動量保存則は Navier-Stokes 方程式が、それぞれ有限体積法により離散化される。本研究で扱う流れのマッハ数は $M < 0.3$ 以下なので非圧縮性流体として扱い、レイノルズ数は 3.41×10^4 なので、低レイノルズ数および回転・旋回流に対し精度の高い RNG k-ε モデルを乱流モデルとして使用する。

2.2 解析モデル

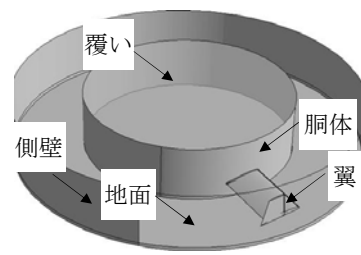
解析対象は回転円盤走行装置である。この装置は地面上を翼が走行する状況を作る装置であり、回転円盤に翼を取り付け回転させることで地面上を走行させる。地面は誤差 $\pm 0.1\text{mm}$ 以下の精度で高さを調整できる。回転円盤上には測定機器が設置され、流れに影響を与えるのを防ぐため覆いを設置する。装置を図1に示す。解析対象の翼は NACA4408 翼型の下面を平らにした NACA4408 改翼型¹⁾ を使用し、主翼弦長は $c = 100\text{mm}$ 、案内翼弦長は下端が $c_s = 73.3\text{mm}$ 、上端が 46.7mm である。図2に翼型の概略図を示す。図3に計算領域を示す。計算領域は回転中心から $10c$ 、高さ方向に $6c$ に設定し、回転円盤の回転領域を直径 $3c$ 、高さ $1.5c$ 、翼が回転走行を行う領域を内径 $3c$ 、外径 $5c$ と設定した。座標系は右手直交座標系を用いて、回転中心を原点とし主流方向に x 軸、翼幅方向に y 軸、高さ方向に z 軸を取る。



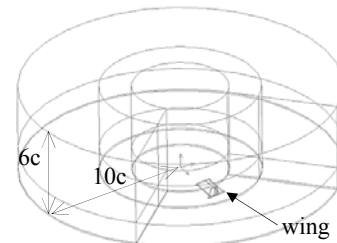
(a) NACA4408 改翼型

(b) 翼解析モデル

図2 翼型概略.



(a) 回転領域



(b) 全体領域

図3 計算領域.

2.3 解析条件

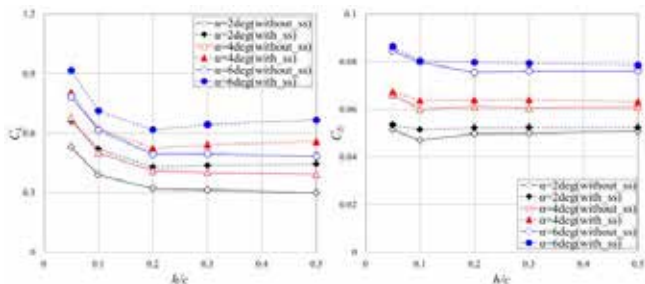
回転円盤の回転数 120rpm より、翼型の翼幅中央の速度を代表速度 $U_\infty = 5.03\text{m/s}$ とし、 $Re = 3.41 \times 10^4$ である。装置を再現するため、地面、側壁は静止壁、翼と覆い、回転円盤は移動壁として設定した。本解析では案内翼と側壁の有無、地面高さとの比 $h/c = 0.5, 0.3, 0.2, 0.1, 0.05$ のパターン、主翼迎角 $\alpha = 2, 4, 6\text{deg}$ 、案内翼迎角 $\alpha_s = 0, 4\text{deg}$ のパターンで解析した。また、実験結果との比較のため案内翼、側壁無し条件で $\alpha_f = -5, 0, 5\text{deg}$ のパターンで解析を行い、無次元数として圧力係数 C_p 、揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D 、 C_{Dm} 、 C_{Ds} 、横力係数 C_{sf} 、揚抗比 C_L/C_D を用いて結果を評価する。

3. 結果と考察

3.1 側壁、案内翼が翼の空力特性に及ぼす影響

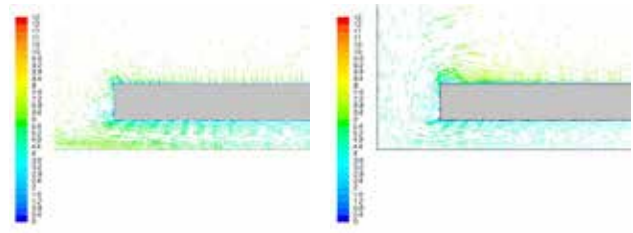
3.1.1 揚力係数、抗力係数及び揚抗比

図4に側壁及び案内翼が各係数に与える影響を示す。ただし、図中の with_ss は案内翼、側壁有り、without_ss は無し条件を示す。側壁と案内翼を設置することで揚力係数は平均で 25~35% 増加し、抗力係数は 3~5% 増加した。その結果、揚抗比は平均で 29.2% 増加し、 $\alpha = 2\text{deg}, h/c = 0.05$ で最も効果が得られた。また、いずれの条件においても地面が近づくにつれ、揚力は上昇し、抗力は一定となった。これは地面効果が発生しており、地面により翼端渦が抑制されラム圧が上昇したためである。図5に y-z 断面の速度ベクトル図を、図6に翼面の圧力コンター図を示す。なお、図5は案内翼の前方、主翼の 1/4 弦長における断面図である。図5、6より、案内翼の影響を受け緑色と青色からなる負圧領域が拡大し、側壁を設置したことで主翼下面の流体が外へ逃げにくくなることで主翼下面の黄色とオレンジ色からなる正圧領域が拡大する。その結果圧力差が増加し、揚力係数が増加したと考えられる。



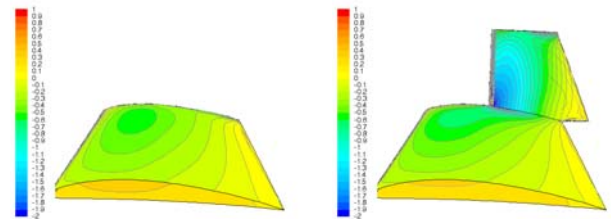
(a) 揚力係数 (b) 抗力係数

図4 側壁及び案内翼の影響.

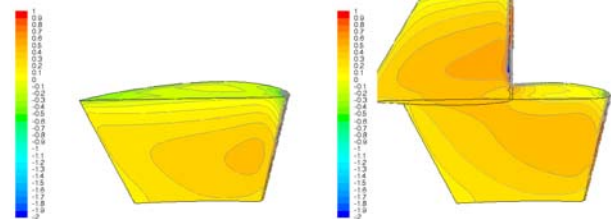


(a) without ss (b) with ss

図5 y-z断面の速度ベクトル図($\alpha = 2\text{deg}, h/c=0.05$).



(a) without ss(上面) (b) with ss(上面)

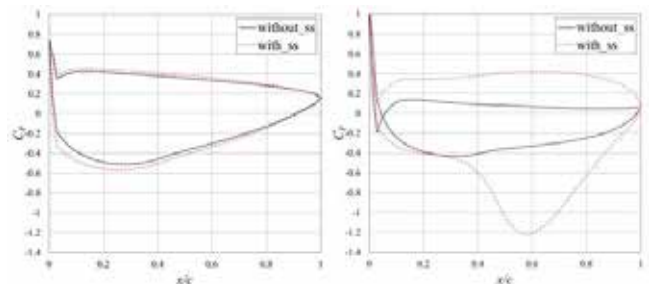


(c) without ss(下面) (d) with ss(下面)

図6 翼面の圧力コンター図($\alpha = 2\text{deg}, h/c = 0.05$).

3.1.2 翼幅方向における圧力分布

図7に主翼の各断面における翼表面上の圧力分布を示す。図7より翼幅中央より $z/b > 0$ 方向において、正圧、負圧ともに拡大していることが分かる。図8に各断面の圧力分布より見積られる揚力係数の比較を示す。図8を見ると $z/b > 0$ では揚力係数が減少せず保持されていることが分かる。以上より、揚力係数の増加は $z/b > 0$ における圧力差の拡大が大きな要因と言える。



(a) $z/b = 0$ (b) $z/b = 0.875$

図7 圧力分布の比較($\alpha = 2\text{deg}, h/c=0.05$).

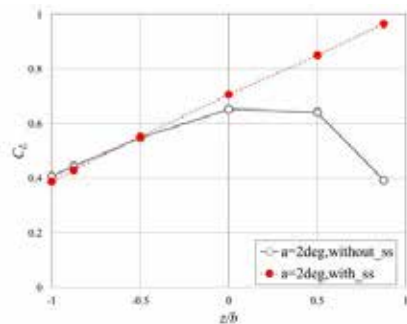


図8 各断面の揚力係数($\alpha = 2\text{deg}$, $h/c = 0.05$).

3.2 主翼、案内翼迎角が空力特性に及ぼす影響

3.2.1 主翼迎角が空力特性に与える影響

図9に主翼迎角が各係数に与える影響を示す。揚力係数と主翼に働く抗力係数は α の増加に伴い線形的に増加する。案内翼に働く抗力係数は α が大きくなると減少する。図10に各迎角における主翼下面からの巻き上げの様子を示す。図10より、 $\alpha = 6\text{deg}$ では巻き上げが発生することが分かる。この巻き上げにより、案内翼に対する流入速度が偏向し、推進力成分が発生する。この影響を受け、抗力が減少すると考えられる。また、巻き上げが発生することで案内翼前縁が負圧となり、圧力差が拡大することで横力も増加する。

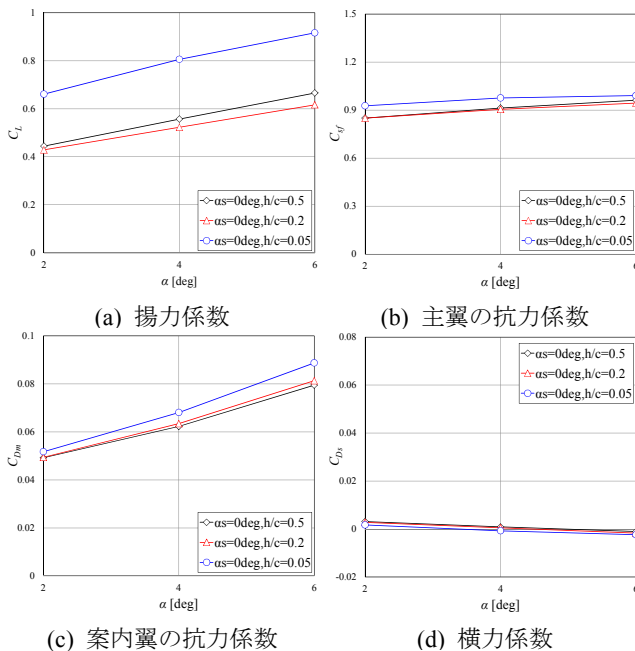


図9 主翼迎角が各係数に与える影響。

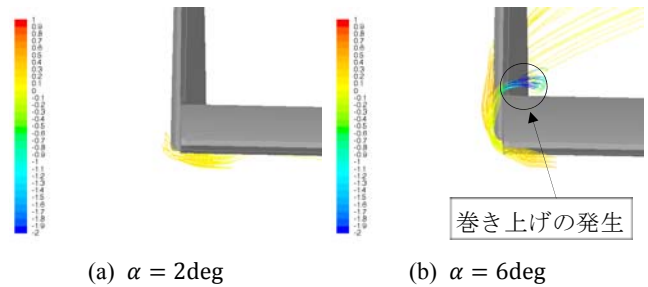


図10 主翼下面からの巻き上げ ($h/c = 0.5$).

3.2.2 案内翼迎角が空力特性に与える影響

図11に案内翼迎角が各係数に与える影響を示す。案内翼迎角が大きくなることで、案内翼付近の主翼上面の負圧領域が拡大するが、その効果が翼全体に広がらないため、圧力差が大きくなる。従って、揚力係数に大きな変化は見られない。これは翼のアスペクト比が大きいことが原因と考えられる。案内翼迎角が大きくなることで、案内翼上の負圧領域、正圧領域ともに拡大することで圧力差が大きくなるため横力係数は線形的に増加する。

3.2.3 案内翼迎角が抗力係数に与える影響

図12に案内翼迎角が抗力係数に与える影響を示す。案内翼迎角が主翼の抗力係数にほとんど影響を与えないのに対し、案内翼の抗力係数は α_s が大きくなることで、線形的に増加することが分かる。その要因を調べるため、図13に主翼及び案内翼の各断面における速度ベクトル図、図14に後縁から見たパスラインを示す。図13(a)、(b)より案内翼迎角が大きくなることで主翼後縁近傍で流れが剥離していることが分かる。また、図13(c)、(d)より案内翼迎角が大きくなることで案内翼後縁近傍で流れが剥離している。従って、流れの剥離は案内翼後縁近傍で起きており、圧力損失が発生し圧力抗力が増加したと考えられる。図14を見てみると、主翼下面からの巻き上げが発生しているものの、剥離に伴う逆流が起きていることが分かる。従って、案内翼迎角が大きくなることで主翼下面からの巻き上げが強くなり、推進力成分も大きくなるが、剥離による圧力損失が大きいため推進力成分が打ち消され、抵抗力となったと考えられる。回転走行において、側壁は曲率を持つため流れてくる流体は曲げられ直線走行よりも主流方向が内側に偏向する。そのため、直線走行時よりも流れが剥離しやすくなると考えられる。

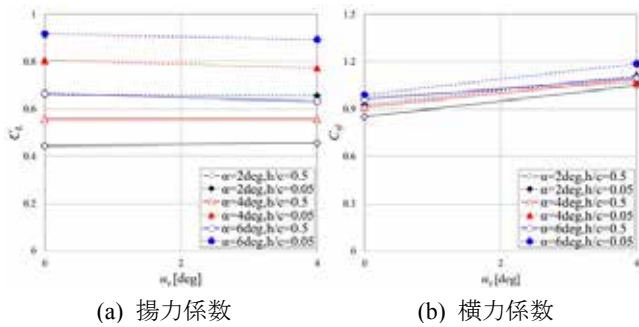


図 11 案内翼迎角が各係数に与える影響(h/c = 0.5).

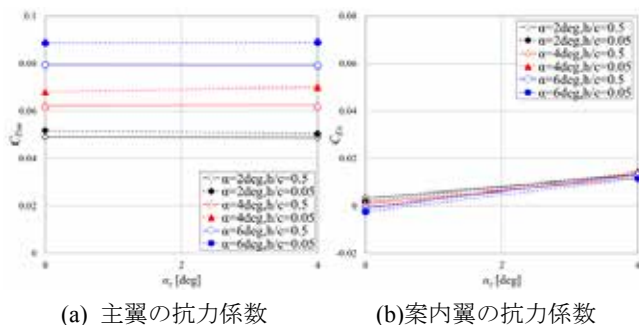


図 12 案内翼迎角が抗力係数に与える影響.

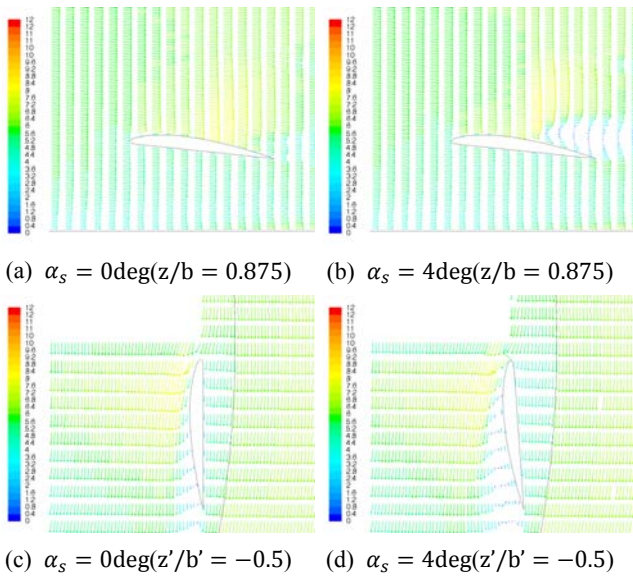


図 13 各断面における速度ベクトル(h/c = 0.5).

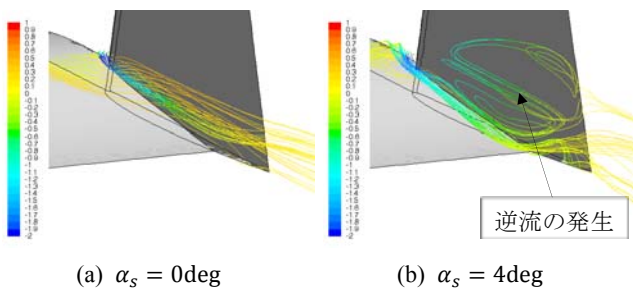


図 14 翼後縁から見たパスライン(h/c = 0.5).

3.3 回転走行の有用性と解析の妥当性

3.3.1 直線走行との対応

回転走行方式の有用性を調べるため直線走行の結果¹⁾と比較する。なお、表 5.1 に示すように両者の解析パラメータは異なるため、傾向の対応関係を調べる。図 15 に主翼迎角が各係数に与える影響、図 16 に主翼表面の圧力分布の比較を示す。主翼迎角が大きくなることで揚力係数と抗力係数は線形的に増加し、横力係数は減少する。回転走行では側壁の曲率のため流れ方向が直線走行よりも内側に偏向され剥離しやすくなるため、抗力係数に大きく差が出ている。また、抗力係数はレイノルズ数の影響を強く受けることも大きな要因だと考えられる。圧力分布はいずれの条件においても $x/c = 0.54$ 付近で案内翼の影響を最も強く受け、負圧が大幅に減少している。

従って、パラメータが異なるため定量的にデータを比較することは困難だが、空力特性の傾向は回転走行でも十分調べることができる。

表 5.1 解析パラメータ.

パラメータ	直線走行	回転走行
レイノルズ数	6.16×10^6	3.41×10^4
アスペクト比	1.087	1.86
c [mm]	1500	100
h/c	0.065	0.05

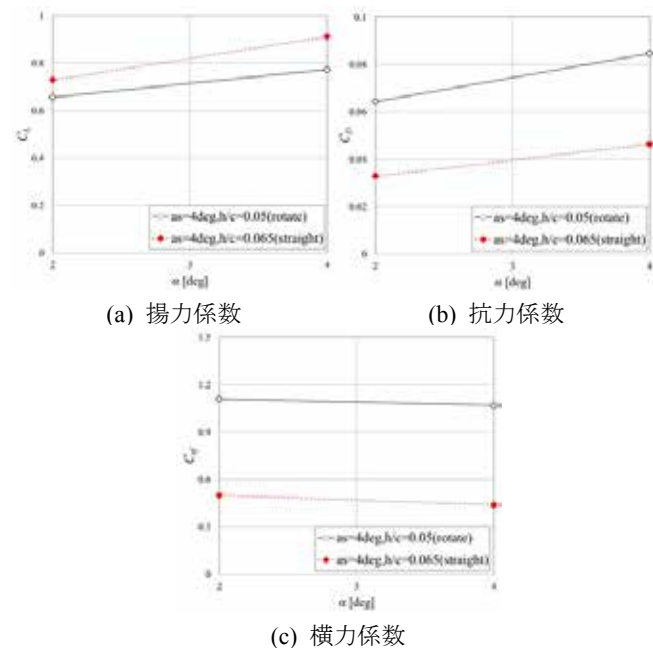


図 15 各係数の比較(主翼迎角が与える影響).

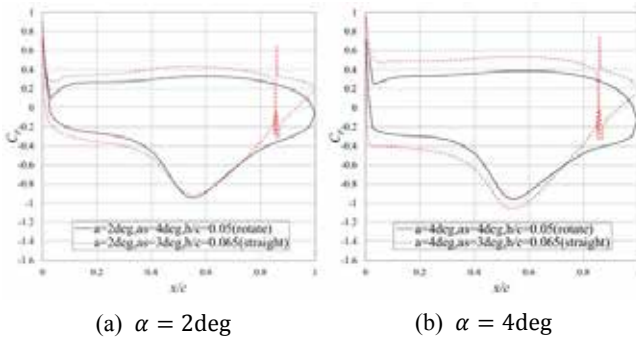


図 16 主翼表面の圧力分布の比較.

3.3.2 実験結果との比較

図 17 に各係数の実験結果との比較を示す。図 17 より、地面が揚力係数に与える影響²⁾とフラップ角が揚力係数に与える影響³⁾に関して解析結果と極めてよく一致する。抗力係数は大きな差があるが、地面の高さに依存しておらず傾向は一致している。実験の抗力係数の測定は揚力係数より 1 桁小さい力を測定しているため、精度高く測定するのは非常に難しく、定量的に解析結果と比較するのは困難である。地面上の圧力分布(h/c = 0.1)⁴⁾では全体的に傾向も値も近い結果となった。実験精度を考慮すれば十分比較できる結果となっており、解析結果に妥当性があると考えられる。以上より、実験結果と傾向が一致しており、中でも揚力係数とフラップの影響は定量的に比較でき、解析の妥当性を得ることができる。

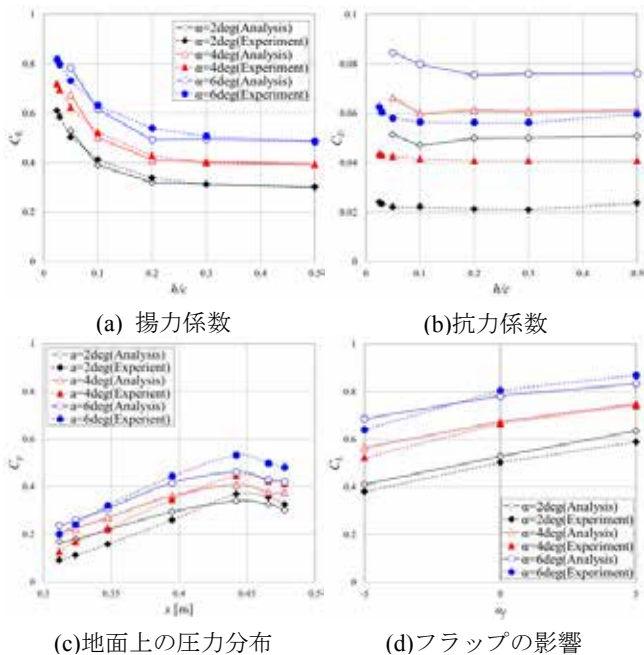


図 17 実験結果と解析結果の比較

4. 結言

本研究結果より以下の知見を得た。

- 1) 迎角が大きくなることで直線走行でも確認された主翼下面からの巻き上げが発生し、案内翼に推進力成分を発生させる。
- 2) 回転走行では側壁に曲率があるため翼後縁近傍で剥離しやすくなる。このため案内翼の取付角の設定に留意する必要がある。
- 3) 直線走行と定量的に比較することは困難だが空力特性の傾向は回転走行とよく一致するので、回転円盤走行装置による実験は有用である。

参考文献

- 1) 長友 修: エアロトレイン翼の空力特性向上に関する三次元数値解析, 日本機械学会論文集, B 編, Vol.77, No.779, pp.1410-1419 (2011).
- 2) 浅野 達郎, 鮫島 本憲: 回転円盤装置を用いたエアロトレイン翼の揚力・抗力係数及び地面圧力の測定, 宮崎大学工学部 2012 年卒業論文.
- 3) 原 正志: 回転円盤装置を用いたエアロトレイン翼の揚力係数と抗力係数の測定, 宮崎大学工学部 2010 年卒業論文.
- 4) 前田 和弥, 増田 翔大: 回転円盤装置を用いたエアロトレイン翼の空力係数及び地面圧力の計測, 宮崎大学工学部 2011 年卒業論文.