

風洞製作とリアウィングの形状とダウンフォースの関係

Relationship between shape of rear wing and down force

田中 佑磨 藤田 奏 平田 壮太 高島 創平
Yuma Tanaka Soh Fujita Sota Hirata Sohei Takabatake

I. 要旨, 概要

リアウィングは車体を地面に押さえ、安定させるために取り付けられており、そのときにリアウィングによって発生する力はダウンフォースと呼ばれる。我々は、実験室の机の大きさ程度の吸い込み型風洞装置を、先行研究をもとに製作し、車体周辺の空気の流れを可視化し、より大きなダウンフォースを生むために8種類のリアウィングの模型を作り調べた。その結果、車体とリアウィングの間を流れる風の風量を多くすることでリアウィング下部の圧力が小さくなり、より多くのダウンフォースを生じることが分かった。

II. 問題提起, 研究目的

毎日のように見かける車の後部についているリアウィングの形状は様々で、何の目的に応じて、形や大きさが異なっているのか疑問に思った。

先行研究を調べていくとリアウィングはレーシングカーのコーナリング速度を上げるために車を路面に押し付ける下向きの力（以下ダウンフォース）を発生させていることが分かった。そこで、本研究ではリアウィングの形状がダウンフォースにどのような影響を与えるのかを調べることを目的とした。

III. 実験方法

【風洞装置製作】

風洞装置とは、風洞装置内の空気の流れを整え、煙などを用いることで、風洞装置内の物体周辺を流れる空気の流れを可視化できる装置である。

風洞製作では参考文献①「自作風洞実験器を用いた空気の流れの可視化～紙飛行機の形状と空気の流れ～（兵庫県立神戸高等学校総合理学科 2年 藤本正直，檜崎桃子，藤本一貴）」で製作されていた風洞装置を参考にした。風洞装置には様々な構造のものがあるが、参考文献をもとに吸い込み型風洞（排風機を用いて空気を流す風洞装置）を作成することにした。

図Ⅲ-1を用いて風洞装置の各部分を説明する。

① ハニカム装置

ハニカム構造の穴によって空気を整流する役割がある。プラスチック段ボールの断面の一边3mmの正方形の穴を重ね合わせて制作した。

② 縮流胴

空気を圧縮し加速する役割がある。長さは風洞装置内を流す風に合わせてプラスチック段ボールの長さを調整して制作した。接着にはグルーガンやビニールテープを使用した。

③ 観測胴

物体周辺の空気を観測する部分である。一面だけアクリル板にすることで風洞内を見ることができ、他はプラスチックダンボールで制作した。接着にはグルーガンを使用した。観測胴と縮流胴の補強に木材を使用した。

④ 排風機

ダクトファン（MDF-201A ミナト電機工業）を使用した（図Ⅲ-2）。均一で空気を吸い込むことができる。

風洞装置では、空気が①のハニカム装置に流れ込み整流され②の縮流胴で空気が圧縮されて加速する。そして、スモークマシンの煙により③の観測胴で空気の流れが可視化される。これが我々の風洞装置である。以下の実験ではこの風洞装置を用いる。

【予備実験①】

予備実験①を行ったときは風洞を吸い込み型と吐き出し型にするのか決めていなかった。そのため、本実験で使用している排風機ではなく送風機を用いて実験を行った。

目的 自作した風洞装置を用いて空気の流れを可視化する。

方法 観測胴に物体を置き、送風機で風洞装置に風を送り、観測胴から物体周辺の空気の流れを観察した。物体は発泡スチロールを使用した。理由は整形しやすいことと手軽に手に入るためだ。発泡スチロールの形状は直方体である。空気の流れの観測にはスモークマシンの煙を使用した。

【予備実験②】

目的 電子ばかりを用いて重さを測定することで、ダウンフォースによる重さの値の変化が確認できるかどうかを調べる。

原理 参考文献④「一般社団法人日本機械学科流体工学部門ホームページ」の内容を参考にした。車のリアウィングによって車体には下向きの揚力が生じる。この理由は、リアウィングに当たった風がリアウィングに沿って曲げられ、このとき空気にはリアウィングから反作用として下向きの力がはたらくからだ。この力をダウンフォースと呼ぶ。

方法 水平面に対する模型の角度を迎え角として、角度の変化に応じてダウンフォースが変化するかどうかを調べる。測定は模型そのものの重さを測り、送風機で風を当てて重さの変化を確認する。「重さの変化（質量の変化）＝（変化後の値）－（変化前の値）」を計算してその結果が正の値であればダウンフォースが発生しているとした。一方で結果が負の値であれば揚力が発生しているとした。

模型付近での送風機による風の風速は 5.4 [m/s] である。この実験に風速は関係ないが、この値は送風機が「弱」の時の風速である。

【本実験①（可視化実験）】

目的 スモークマシンを用いて車体に流れる空気の流れを可視化し、煙の流れを観察する。

準備物 風洞装置 インダストリアルクレイ（粘土）で製作した車の模型 スモークマシン
排風機 デジタルカメラ

方法 リアウィングを取り付けた車の模型を風洞内に置き排風機で風を流す。スモークマシンの煙を金属のノズルを通して、風洞内の模型前方にあてる。煙の様子を目視で観察する。

【本実験②】

目的 リアウィングの形状によるダウンフォースの値の変化を調べる。

方法 まず、土台となる車体に様々な形状のリアウィングを取り付け、風洞内に設置する。リアウィングは 8 種類用意した（図IV-1 参照）。次に排風機で風を流しダウンフォースを発生させる。そして、電子ばかりで発生したダウンフォースの値を読み取る。値の決定方法としてリアウィングを取り付けた車体の重さの測定値を風を流した時の重さを 3 回測定した平均値から引いたものを重さの変化の値とした。

初めは、風洞内に電子ばかりを置いてその上に車体を乗せ、重さの変化を読み取ろうとした。しかし、全てのリアウィングにおいて、重さの変化の値が負となってしまった。これは、風洞内に電子ばかりを設置したことで、電子ばかりが直接風を受け、実験の目的とは関係のない力が発生してしまったと考えられた。そこで、電子ばかりを風洞の外に設置した。しかし、まだ重さの変化の値が負の値を示してしまった。これは、風洞自体が風から上向きの力を受けて風洞に浮力が発生してしまったと考えられた。このため、車体と風洞を接触させなければよいと考えた。そこで、風洞の観測胴下部に穴を空け、金属棒を挿入し、棒の上部に車体を設置し、下部におもりを取り付け、その全体の重さの変化の値を読み取った。

実験上の注意点

値の誤差を小さくするために、実験中は、風洞及び、風洞を設置している机に触らないように注意した。また、エアコンから吹き出す風による質量の変化が見られたため、紙で測定部分を上から覆うようにしてエアコンの風を遮った。また、車体に棒とおもりを取り付けたものと風洞が接触して二物体間に別の力が生じないように、観察胴に空ける穴の大きさを調節して二物体同士が触れないようにした。

IV. 結果

【予備実験①】

物体の周辺を空気が流れているのが確認でき、空気の流れを可視化できた。

【予備実験②】

10°ごとに計測を行った。結果を図V-1 に示す。

【本実験①】

実験の様子を図V-2 に示す。煙が車体に沿って流れていくことが確認できた。

リアウィングの上部と下部に煙が分かれていくのが観察できた。

【本実験②】

結果を図 V-3 に示す。①～⑦のリアウィングではダウンフォースの発生が確認できた。特に①での値が大きいことから、ダウンフォースの発生が著しい事が分かった。逆に②、⑥、⑦では値が小さいことから、

ダウンフォースの発生はほとんど見られない事が分かった。⑧では負の値を示したことから、揚力が発生してしまったことが分かった。つまり形状によって、ダウンフォースの値は異なり、揚力が発生してしまう可能性も含まれているということとなる。

V. 考察

【予備実験①】

送風機を使用した吐き出し型だと、風を吹き込んでいるため観測胴内の風速が一定になっていなかった。また、送風機では風速が小さかった。空気の流れを可視化できたが、煙が拡散してしまうことで空気の流れが分かりにくくなってしまった。

このことから、排風機の購入を決め、以後排風機を用いた吸い込み型風洞を使用することとした。

【予備実験②】

0°~90°のときは質量の変化が正であり、ダウンフォースが発生した。100°~180°のときは質量の変化が負であり、揚力が発生した。また、50°のときダウンフォースが最も大きく 26g、140°のとき揚力が最も大きく 29g 質量が変化した。

【本実験①】

空気は車体に沿って流れた。車体にぶつかった空気は車体から大きく離れて流れることはなかった。車体を通り抜けた空気は通り抜けた後も乱れることなく後方に流れた。

【本実験②】

ダウンフォースとはそもそも、先述にもある通り、リアウィング上部とリアウィングと車体の間での圧力差（リアウィング上部が高く、リアウィングと車体の間が低い）によって生じるものである。つまり、我々は車体周辺の圧力の高低を知ることによってダウンフォースの発生を調べる事が出来ると思った。しかし今回の実験は実際に車体が走行している場面を忠実に再現しようとしており、車体周辺に風圧測定器などの機器を設置することが出来ない（風の流れを阻害してしまう可能性がある）ため、圧力を視覚的に判断する必要があると考えた。そこで大学で学ぶ流体力学から参考にさせて頂いたベルヌーイの定理を利用して考察する。

(i) ベルヌーイの定理 : 流体の速度が増加すると圧力は低下する。

この定理により、圧力が分かるためには、流体の速度、すなわち、風速が分かればよいということになる。しかし、風速も機器なしでは視覚的に判断することが出来ない。そこで、(ii) で説明する風量計算式を利用して考察する。

(ii) 風量計算式 : 風量(m^3/mi)=通過風速(m/s)×通過面積(m^2)×60(s)

実験の設備上、通過面積(m^2)×60(s)は一定とみなす（通過面積は車体とリアウィングの間、リアウィング上部とする）。これにより風速が分かるためには、風量が分かればよいということになる。風量はスモークマシンを用いることによって視覚的に大小を判断することが出来る。例えば、風量が多いということは(ii)より、風速が大きいということになる。風速が大きいということは、(i)より、圧力は低くなっているということになる。逆に、風量が少ないということは圧力が高いということになる。つまり、スモークマシンを用いることで、空気の圧力の高低を視覚的に判断できるということになる。

ベルヌーイの定理と風量計算式から、風量が多くなるほど圧力が低くなるということが分かったため、車体とリアウィング間に流れる風の風量が多いほどリアウィング下部の圧力が低くなりダウンフォースも大きくなると仮定した。

実験②で変化量の大きかったリアウィングはリアウィングで車体の周辺を流れる風がうまく整流され車体とリアウィングの間に風が多く流れ込んでいた。しかし変化量の小さかったリアウィングは車体周辺を流れる風がうまく整流されておらず車体とリアウィングの間にあまり風が流れ込んでいなかった。したがって車体とリアウィング間に流れる風の量が多くなることでより大きなダウンフォースが生まれることが分かった。

以上のことから仮定した通り、車体とリアウィングの間に流れる風量が多いほどリアウィング下部の圧力が小さくなるためダウンフォースも大きくなるということが考えられる。

ただ1つだけ揚力が発生したリアウィング8については揚力が発生した原因は以下の3つが考えられた。

- ・ リアウィングの設置位置が高かった
- ・ リアウィングの形状(2段重ね)による
- ・ リアウィング上部に流れる風量が多かった

直接的な原因としては、1つ目の原因のリアウィングの設置位置については設置位置が高かったことで車体周辺を流れる風がうまく整流されなかったこと、2つ目の原因のリアウィングの形状については現実

のリアウィングの形状をモデルとして作成したが手作業で作成したため完全に再現できなかったことであった。また、3つ目の原因のリアウィングの上部に流れる風量が多くなったことで、リアウィングの上部が下部よりも圧力が低くなってしまったことが3つの原因のうち主な揚力が発生した直接的な原因であったと考えた。

VI. 結論（課題）

車体周辺を流れる風をリアウィングで整流し、車体とリアウィングの間を流れる風の風量を多くすることでリアウィング下部の圧力が小さくなり、より多くのダウンフォースを生じることができていることが分かった。

【今後の展望（課題）】

リアウィングをつけることで確かにダウンフォースが生じたことが確認できたが、どの形状が車体に取り付けた場合ちょうどよいダウンフォースを生むのか調べる。

リアウィングを取り付ける高さについても我々の実験では、高さを統一して行ったが、高さについては考慮できていなかったため、どの高さが車検を通り、ダウンフォースを生むのに適しているか調べる。同じく取り付け角度も予備実験では50°が一番強いダウンフォースを生んでいたがそれが適用できるのか調べる。

風洞装置での風の可視化においてよりリアウィング周辺の風の流れが見やすくなるようにノズルの位置などを変えて実験する。

VII. 参考文献

- ① 自作風洞実験器を用いた空気の流れの可視化 ～紙飛行機の形状と空気の流れ～
兵庫県立神戸高等学校 2013年度 SSH研究
総合理学科2年 藤本正直 檜崎桃子 藤田一貴

内容

高校生レベルで高精度かつ安価な風洞実験器を自作
「紙飛行機」を題材として、空気の流れを風洞実験器内で可視化

- ② 鉄道先頭形状による空気抵抗の違いと流れの可視化
小田武春

内容

風洞を用いて流れの可視化(鉄道先頭形状)

- ③ 鳥人間入門 九州大学鳥人間チーム (2020年 4月8日 最終アクセス)

内容

リアウィングの上下面で風速に違いが生じる
物体後方での渦の発生が圧力の低下を招く

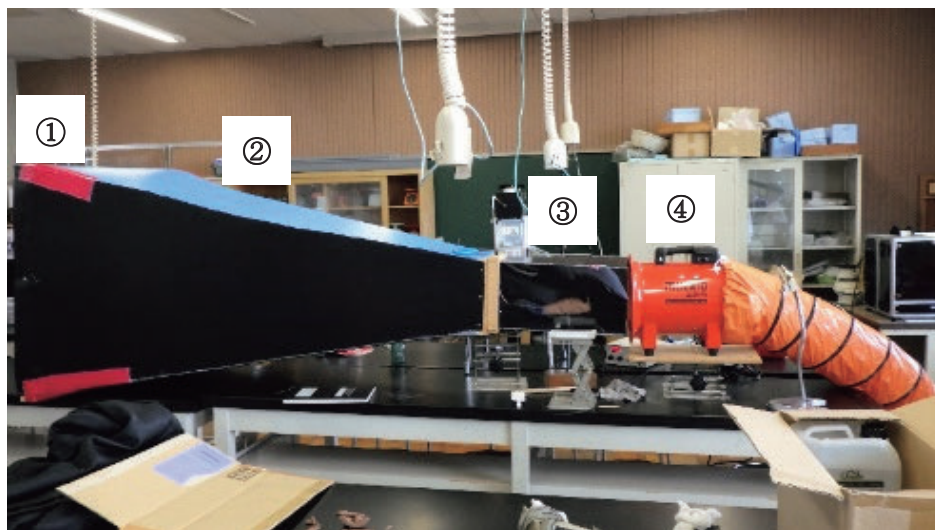
<https://www.q-birdman.jp/introduction/theory.html>

- ④ 一般社団法人日本機械学科流体工学部門ホームページ (2020年 8月1日 最終アクセス)
<https://www.jsme-fed.org/>

VIII. 謝辞

ご指導いただいた、佐藤哲也先生、四茂野志音先生、東京大学大学院新領域創成科学研究科先端エネルギー工学専攻教授鈴木宏二郎先生をはじめとする本研究に携わって頂いた全ての方々に深く感謝します。

IX. 図表・画像



図III-1 風洞装置の概観



図III-2 (MDF-201A ミナト電機工業)



図IV-1 車体に取り付けるリアウィング

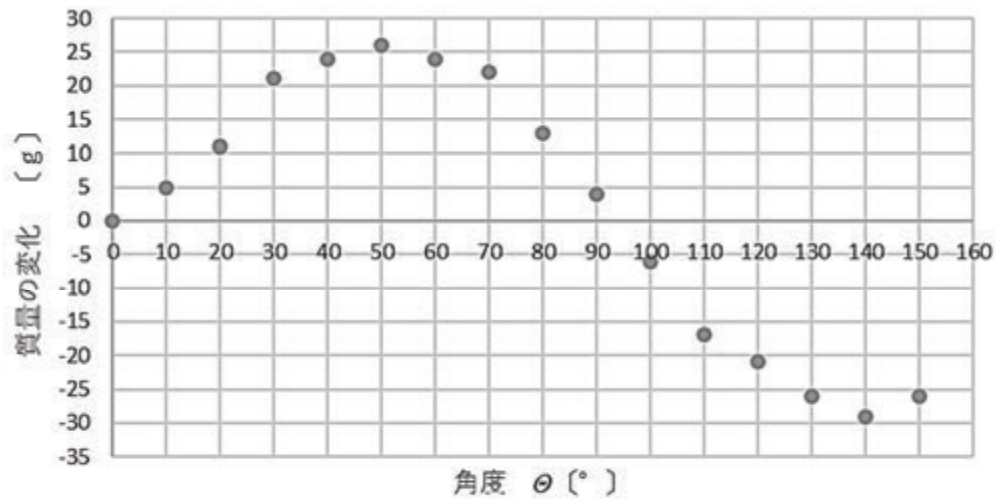


図 V-1 風速5.4 [m/s] のときの角度と質量の変化の関係

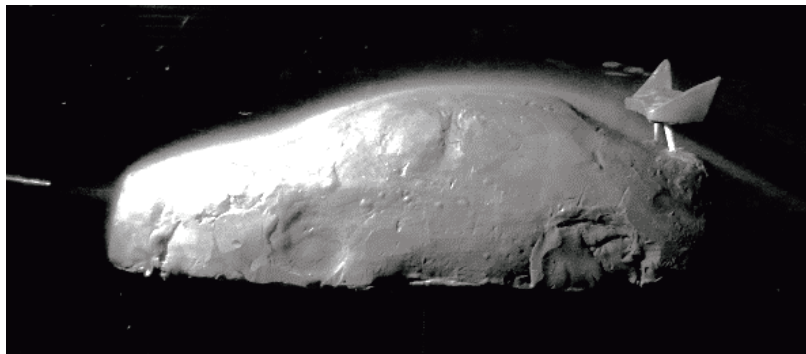
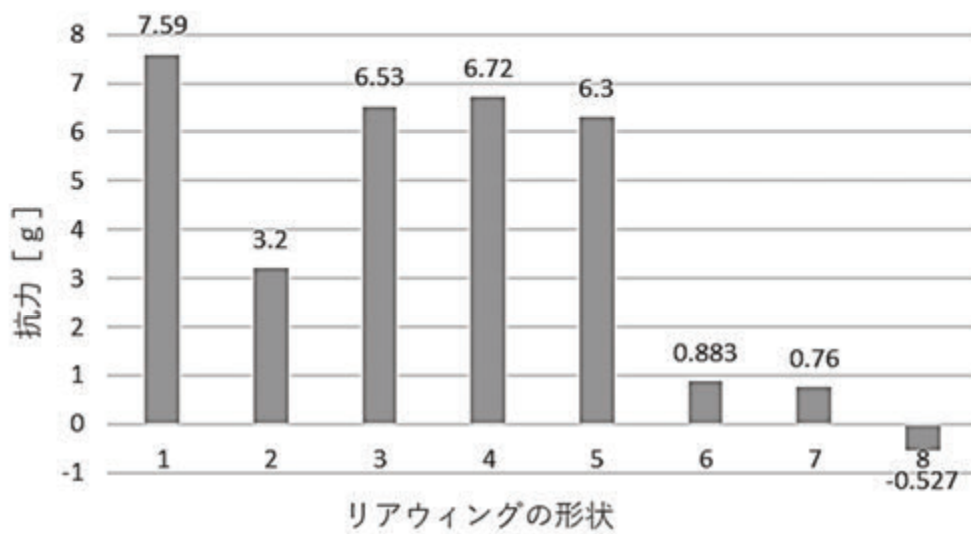


図 V-2 車体周辺の空気の流れの様子



図V-3 リアウイングの形状と抗力