市立札幌旭丘高等学校数理データサイエンス科
2023年度(65期)SDS探究　研究報告書

研究タイトル

翼の形状と航空機の特性について

班番号

4

班名

KFC

班員名

井内恒之介　Konosuke Iuchi
岡山彩夏　Ayaka Okayama
梶谷悠馬　Yuma Kajitani
細川朝光　Tomomitsu Hosokawa
三津知暁　Tomoaki Mitsu
山本悠悟　Yugo Yamamoto

指導教員

阿部香澄
矢野友規

目次

【概要】 2
【Abstract】 2
第1章　はじめに 3
1.1　研究の背景と目的 3
1.2　用語説明 3
1.3　先行研究 4
第2章　手法 4
2.1　前準備 4
2.2　形状の決定 4
2.3　3Dモデルでのシュミレーション 5
第3章　結果と考察 6
3.1　結果 7
3.1.1　翼平面形と揚力の関係 7
3.1.2　仰角と揚力の関係 7
3.1.3　仰角と抗力の関係 8
3.2　考察 8
3.2.2　仰角と揚力の関係 8
3.2.3　仰角と抗力の関係 8
3.2.4　欠測値について 8
3.3　展望 9
第4章　発表報告 9
4.1　SDS成果発表会 10
4.2　ST・SDS発表会 11
第5章　終わりに 12
5.1　研究における個人の役割 12
5.1.1　井内恒之介 12
5.1.2　岡山彩夏 12
5.1.3　梶谷悠馬 12
5.1.4　細川朝光 12
5.1.5　三津知暁 12
5.1.6　山本悠悟 12
5.2　感想 13
5.2.1　井内恒之介 13
5.2.2　岡山彩夏 13
5.2.3　梶谷悠馬 13
5.2.4　細川朝光 14
5.2.5　三津知暁 14
5.2.6　山本悠悟 14
参考文献 15

【概要】

北海道の荷物輸送において小型航空機のニーズが今後高まると予想し、効率的に飛行できる航空機の翼平面形について研究した。まず、いくつかの自作の機体による飛行実験を行い、その中からもっとも飛行する機体を割り出し、その機体の翼の角度を三種類に変化させて各翼型を作成し、それぞれの翼型を3Dモデル化した。次に、コンピューターソフトを使って仰角を5度ずつ変化させ、風を当てるシミュレーション計算を行い、設定した条件下での揚力を計測した。その結果、仰角が40°から45°の時に揚力が最大になることが判明した。

キーワード：小型航空機、翼平面形、物流

（文責：岡山彩夏）

【Abstract】

We predicted an increasing need for small aircraft to transport cargo in Hokkaido and researched the optimal wing planform for efficient flight. Initially, we identified the best handmade aircraft through flight experiments and designed three airfoil types with varying wing angles. Subsequently, we created 3D models of these airfoils and used simulation software to calculate the lift force, altering the elevation angles in 5-degree increments. The results indicated that the lift force was greatest when the elevation angle ranged between 40 and 45 degrees.

Key words：small aircraft, wing planform, logistics

（文責：三津知暁）

第1章　はじめに

1.1　研究の背景と目的

現在北海道では少子高齢化が進行しており、集落間の距離が離れているため、人口のすくない長距離間の集落を効率的に結ぶ必要がある。また、物流の2024年問題[1]など、物流業界を取り巻く労働環境は厳しくなっている。それらの問題を解決するため、トラックよりも長距離で効率的に物品を運搬できる小型航空機の開発を目指した。しかし、いきなり航空機を作ることは非常に難しいため、翼平面形の研究から始めた。

（文責：三津知暁）

1.2　用語説明

仰角

この研究における仰角とは、航空機を横から見た時に地面や水面と航空機がなす角のことをいう。この研究では、仰角が変化することで飛び方がどう変化するかについて実験で調べた。今回は0°から45°の間で5°ずつ変化させ実験した。

揚力

揚力とは、飛行機の翼によって発生する鉛直上向きに働く力のことをいう。この研究では、仰角による揚力の変化について調べた。

翼平面形

翼を真上から見た時の形状。今回の実験では元の形を変化させて三種類の翼平面形[2]を作成し、対照実験を行った。

物流の2024年問題

2024年4月に施行された、改正労働基準法によってトラックの運転手が不足するという問題。

抗力

流体の中を動く物体に働く、運動を妨げる力。

（文責：岡山彩夏）

[1] 第1章 1.2参照
[2] 第2章 2.3参照

1.3 先行研究

私達は今回の研究を進める過程で、2015年、九州工業大学佐々木岳氏による「火星探査航空機主翼翼型の多目的最適設計探索とクラスタ分析を用いたデータマイニング」という論文を参照した。[3]この論文は、世界初の航空機による惑星探査を目指す火星探査航空機を想定し、低レイノルズ数領域における新たな翼型設計手法を提案する研究である。具体的には、低レイノルズ数での形状と性能の相関があるという結論が報告されていた。

（文責：岡山彩夏）

第2章　手法

ここでは、翼の形状による特性について考察するための手法を述べる。

（文責：山本悠悟）

2.1 前準備

3Dモデルを作成する前に、実際に模型を作成し、最も浮遊する時間が長かった翼を実験に使用する。一定の力で翼を飛ばすため、前後それぞれ両端を固定し、3Dプリンターで作成した機体をのせる台に取り付けて動力を得る。機体をのせる台の周りに爪楊枝でガイドを取り付け、機体を水平に飛ばせるようにした。

（文責：山本悠悟）

2.2 形状の決定

まずはどのような翼の形状を使うかを決定する。割り箸を機体としてさまざまな形状の翼を厚紙作り、前準備で作成したカタパルトを使い体育館のキャットウォークから発射する。この時に一番長い時間飛んでいた翼を今後の研究で使用する。

[3] 参考文献[1]参照

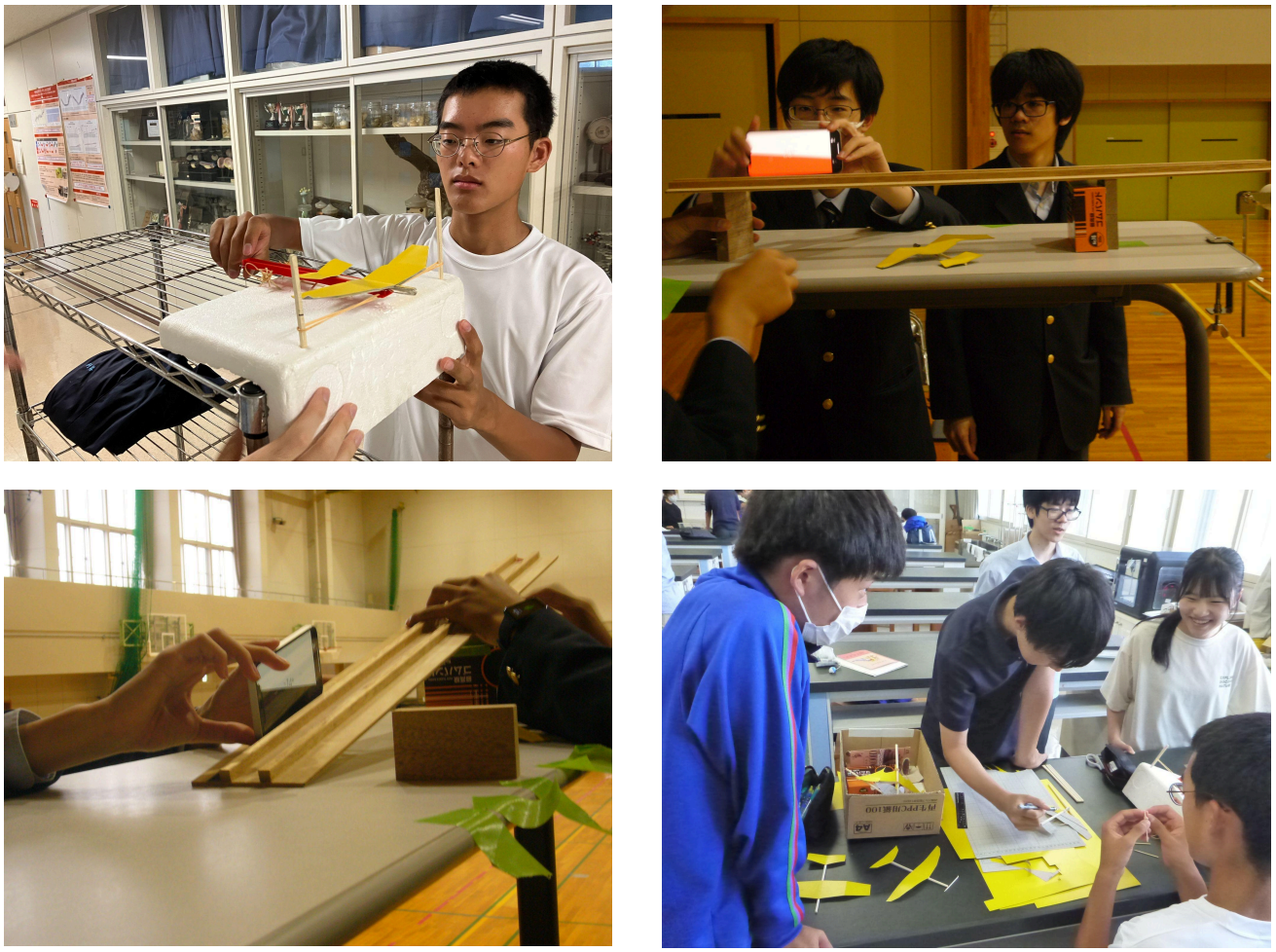


図2.1 実験中の様子

（文責：山本悠悟）

2.3　3Dモデルでのシュミレーション

2.2で決定した翼の形をもとに、図1のような3Dモデルと、このモデルを前後に等積変形させた合計三種類のモデルを設計した。図2の条件の元、3Dモデルに5°　ずつ仰角を変えて風を当て、揚力を計測した。

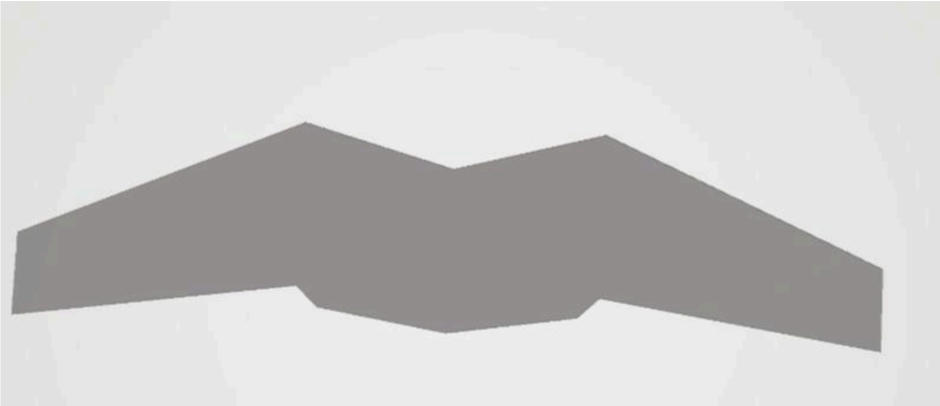


図2.2 使用した3Dモデル

```
//========================================================================//
//   Flowsquare+ parameter file...              -- 2023R2.0 --            //
//------------------------------------------------------------------------//
//   You may directly edit this file, but follow below rules. Each        //
//   parameter entry consists of three blocks divided by [SPACE] or       //
//   double-slash(//). The order of these entries can be arbitrary.       //
//   Example:                                                             //
//   003:name     0.00123456789   // some explanation of the parameter    //
//   ^^^^^^^^^    ^^^^^^^^^^^^^     ^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^^   //
//   1st block      2nd block         3rd block starts after (//).        //
//========================================================================//
----- General Parameters ------------------------------------------------------------------------------

002:loopmax                               100  // ポアソン方程式に関する収束計算の最大繰り返し計算数。収束計算は、loopmaxに達すると無条件で終了する。
003:omega                                 1.8  // ポアソン方程式の計算に用いるSOR法に関する収束速度係数。通常1.8が最適であるが、計算が発散する場合は、1により近い値を用いることもある。
004:deltat                                0.1  // シミュレーション中の時間ステップ幅（s）。指定した場合、時間ステップ幅はcflにより動的に決定されず、常に指定した値をとる。
005:cmode                                   0  // シミュレーションモード。ラジオボタンにより選択。[0] 流体解析モード（密度一定の液体、及び気体用）[1] 熱流体解析モード（温度変動のある理想気体を仮定）
006:parallel                                2  // シミュレーションにおける並列計算のレベル。npx, npy, npzは自動で割り当てられる。[0] シリアル（並列無し） [1] レベル茸, 2並列 [2] レベル梅, max(2, maxThreadsAvail/4) [3] レベル竹, max(2,
maxThreadsAvail/2) [4] レベル松, max(2, maxThreadsAvail)
007:domx                                 2000  // シミュレーション・ウィンドウの暫定横幅サイズ（ピクセル）。1600ピクセル以上推奨。
008:nx                                     80  // x方向格子点数。格子点数は、計算領域の縦横比などに関係なく設定できる。
009:ny                                     80  // y方向格子点数。格子点数は、計算領域の縦横比などに関係なく設定できる。
010:nz                                     40  // z方向格子点数。格子点数は、計算領域の縦横比などに関係なく設定できる。2次元シミュレーションの場合は、nzを設定しない、またはnz=1を指定。
011:lx                                      3  // x方向領域物理サイズ（m）。描画される計算領域アスペクト比は、本サイズに基づく。
012:ly                                      3  // y方向領域物理サイズ（m）。描画される計算領域アスペクト比は、本サイズに基づく。
013:lz                                      3  // z方向領域物理サイズ（m）。描画される計算領域アスペクト比は、本サイズに基づく。
014:sts                                     0  // シミュレーション開始時のタイムステップ。全ての新規シミュレーションは0ステップから開始される。シミュレーションの再スタートの場合は、stsで指定する（0ではない）タイムステップからのシミュレーション再開と
なるが、本タイムステップにおいて前回のシミュレーションで、瞬時場ファイルが出力されていることが必要。nfile参照。
015:latts                                5000  // シミュレーション終了時のタイムステップ。
016:nfig                                   10  // シミュレーション描画画面の画像出力頻度。nfig>0を指定すると、nfigタイムステップごとに画像を出力する。出力された画像は、プロジェクト・フォルダ内のfigsフォルダにタイムステップから始まるファイル名で保
存される。頻繁に保存しすぎると、計算速度に影響が出るので注意。
017:nfile                                 300  // シミュレーションの瞬時結果ファイル出力頻度。nfile>0を指定すると、nfileタイムステップごとに瞬時の結果を出力する。出力された画像は、プロジェクト・フォルダ内のdumpフォルダにタイムステップから始まるフ
ォルダ名で保存される。また、保存したタイムステップから、シミュレーションの再スタートや、解析モードにおける実行が可能。
----- Boundary and Initial Conditions ---------------------------------------------------------------

019:presW                          1.0000E+05  // White（ホワイト）。境界条件ファイル（bcで始まるビットマップ・ファイル）にて指定される、計算領域内の白の領域における初期圧力（Pa）。実質的には、本圧力が領域全体の初期圧力となる。1気圧は、101325
(Pa)、約1.0e+5 (Pa)。
020:uinW                              50.0000  // White（ホワイト）。境界条件ファイルにて指定される、計算領域内の白の領域における初期x方向速度成分（m/s）。
021:rhoW                               1.2000  // White（ホワイト）。境界条件ファイルにて指定される、計算領域内の白の領域における初期密度（kg/m^3)。常温、常圧の空気の密度は、1.2（kg/m^3)。cmode=0（流体解析モード）の時のみ有効で、本密度が領域内
の流体密度となる。
022:uinB                                   42  // Blue（ブルー）。境界条件画像ファイルで指定する、青色（流入）境界条件に適用されるx方向速度成分（m/s）。全x, y, z方向速度成分をゼロとすると、青色領域は個体壁として取り扱われる。'-'を指定すると、本速
度成分は本境界で拘束されない。
----- Physical and Model Parameters -----------------------------------------------------------------

024:mu                             0.4000E-05  // 流体の粘性係数（Pa*s)。Flowsquare+では、温度依存性は考慮しない。常温・常圧において、空気はmu=1.8E-5（Pa*s)、水はmu=1.0E-3（Pa*s)。
----- Graphics & Visualization Parameters -----------------------------------------------------------

026:ndiv                                    4  // 速度ベクトル、トレーサー粒子、流線などの表示に用いられる格子点数間隔。ndiv格子点ごとに1つのベクトル、粒子（初期位置）、流線が表示される。
#End of file
```

図2.3 シミュレーションの条件

Up5mは、図1の元のモデルから羽の両端を面積を変えることなく5mだけ上側に移動させた形状のことを指す。反対にDown5mは、元のモデルから羽の両端を面積を変えることなく5mだけ下側に移動させた形状のことを指す。

（文責：山本悠悟）

第3章　結果と考察

シミュレーションで収集したデータを使用する。仰角と翼平面形を変えることで揚力や抗力がどんな変化をするかを調べることが本研究の目的である。

そこで、翼平面形を変えた状態で仰角を変化させてシミュレーションをして取ったデータから、翼平面形、仰角、揚力、抗力の間にどのような関係があるかを分析する。

（文責：細川朝光）

3.1 結果

迎角(度)	揚力(N)
0	欠測
5	146588.4
10	欠測
15	6045909
20	欠測
25	10254429
30	12137481
35	14714074
40	欠測
45	15284408

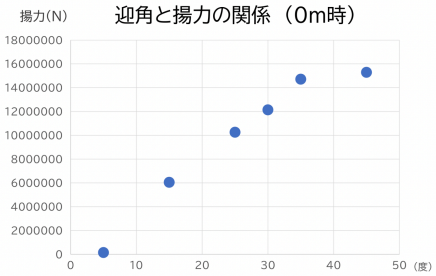


図3.1 0m時の仰角と揚力の関係

迎角(度)	揚力(N)
0	67153
5	1942686
10	3833306
15	6001154
20	欠測
25	11414633
30	12265915
35	14608246
40	19294842
45	18135759

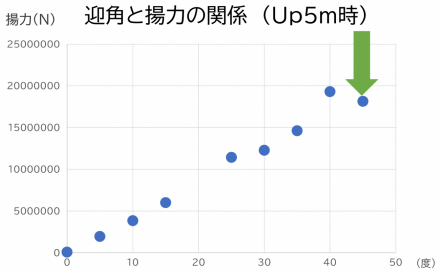


図3.2 Up5m時の仰角と揚力の関係

迎角(度)	揚力(N)
0	262982.2
5	2090723
10	4255866
15	欠測
20	欠測
25	欠測
30	13615596
35	14056392
40	14154033
45	

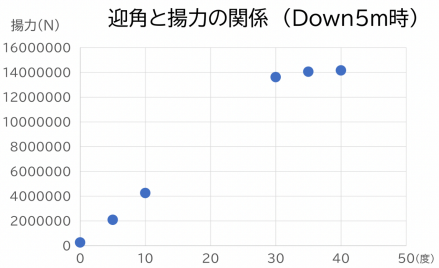


図3.3 Down5m時の仰角と揚力の関係

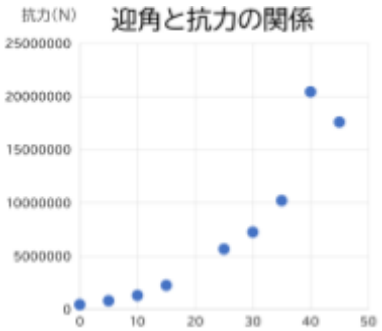


図3.4 仰角と抗力の関係

3.1.1 翼平面形と揚力の関係

翼平面形のみを変化させてシミュレーションを行った結果を述べる。(図3.1、3.2、3.3)揚力の変化は3つの翼平面形において大きな差は見られなかった。

（文責：細川朝光）

3.1.2 仰角と揚力の関係

仰角のみを変化させてシミュレーションを行った結果を述べる。(図3.1、3.2、3.3)揚力は仰角が45°になるまではほとんど仰角に比例しているように大きくなっていた。仰角が40°から45°を超えると揚力はそれ以上大きくなることはなく、減少もしくは停滞するという結果になった。

（文責：細川朝光）

3.1.3 仰角と抗力の関係

仰角のみを変化させてシミュレーションを行った結果を述べる(図3.4)。抗力は仰角が大きくなるにつれて大きくなり、揚力と同じように仰角が40°から45°になるとそれ以上大きくならなかった。ただ、図3.2と図3.4を比較すると、変化の仕方が抗力のほうが緩やかであることが分かる。

(文責:細川朝光)

3.2 考察

3.2.1 翼平面形と揚力の関係

0m、Up5m、Down5mの3種類において大きな差は見られなかったことから、図2.1の元のモデルから羽の両端を面積を変えることなく5mだけ上下側に移動させても、揚力には大きく影響しない。

(文責:岡山彩夏)

3.2.2 仰角と揚力の関係

仰角が45°の時に揚力が最大となることから、今回のシミュレーションからは仰角が45°の際にが最も効率がいいと考えられる。

(文責:岡山彩夏)

3.2.3 仰角と抗力の関係

揚力も抗力も仰角が40°から45°のときに最大になるが最も少ないエネルギーで航空機を飛ばすためには、仰角を15°から20°にしたときだと分かる。

(文責:細川朝光)

3.2.4 欠測値について

本実験では値が一意に定まらなかったため欠測値として扱った。例として図3.5が挙げられる。また図4のように揚力が負の値になる場合も欠測値として扱った。

値が収束しなかった理由について、適切なステップ数が設定されていなかった、解析領域の大きさが不十分だった、メッシュが粗かった、等の要因が考えられる。これらの値は計算精度を高める上で重要であるが、PCの計算能力は有限であるため、必要な値をとることができなかった。

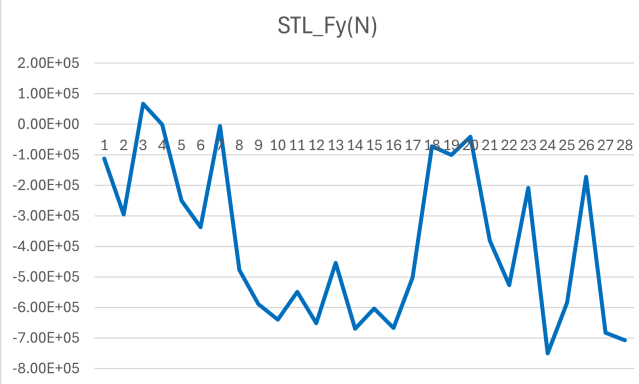
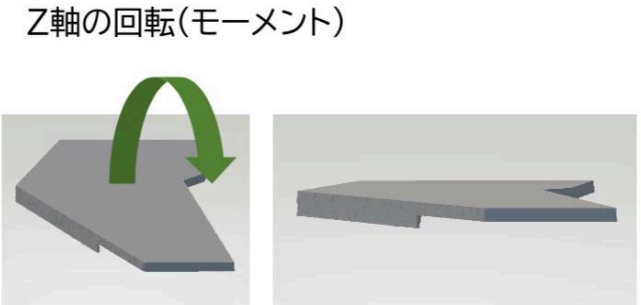


図3.5 時間経過ごとの揚力変化(一意でないグラフ)



値が一意に定まらない際に揚力、抗力以外に何かの力がかかっているのではないかと考えた。その結果、値が一意に定まる場合にはZ軸モーメントが負の値をとり、定まらない場合には正の値を取っていた。Z軸モーメントの向きによる違いとして負の値をとる際には機体が右に傾く力が働き、一方正の値をとる際には左に傾く力が働く。機体が左に傾いた際に風が翼の上側に当たり下へと押されることによりバランスを崩し回転してしまい一意の値を取らないということが起こったと考えられる。翼の構造は同じであるのに一部角度で回転運動が起きてしまうことについてはなぜ起きているのかは判明できなかった。

(文責:梶谷悠馬・井内恒之介)

3.3 展望

今後の展望としては、データの欠測となった原因と考えられる点[4]を修正し、欠測なくデータを取れるようにしたい。また、実際の機体を制作し飛行実験を行った際に同じ結果を得ることができるのかや、さらに翼平面形を変化させたときの変化について調べていきたい。そして、抗力と揚力の関係も含めて論じられるようシミュレーションを実施したい。

(文責:岡山彩夏・三津知暁)

第4章 発表報告

この章では校内で行われたSDS成果発表会と、ST・SDS発表会の概要と結果、その評価を行う。

(文責:岡山彩夏)

[4] 第3章 3.2.4参照

4.1 SDS成果発表会

概要

2023年12月6日水曜日にC328教室で行われた。事前に作成していたスライドを用いて、口頭発表を行い、その後に質疑応答が行われた。

結果と評価

当日の質問内容としては羽の先に発生する渦は考慮しているのかなどの質問を受けた。

また、評価アンケートの回答者は40人だった。評価項目は大きく分けて「研究内容について」「研究の方法について」「発表について」の3つである。すべて5段階で評価される。詳細を以下に示す。

まず、研究内容についての評価について示す。評価点の平均は、4.58だった。「学問的意義・面白さ」があるテーマ設定であるという項目の平均点は4.68と高かった。しかし、「社会課題の解決」に貢献するテーマ設定であるという項目の平均点が4.48であった。このことより、より社会課題に焦点を当てた課題設定が必要である。

次に、研究の方法についての評価について示す。評価点の平均は、4.39だった。「観察、実験、調査、創作の内容」が優れているという項目の平均点が4.70と高かったが、「先行研究」をよく調べているという項目の平均点が3.68と低かった。そのため、先行研究から学んだことなどを、伝える必要があるといえる。

最後に、発表についての評価について示す。評価の平均点は4.64だった。スライドの見やすさ(グラフ、表、レイアウトなど)の項目の平均点が4.80とすべての項目の中で一番高かった。

図4.1 SDS成果発表会の様子

（文責：岡山彩夏）

4.2　ST・SDS発表会

概要

2023年2月6日火曜日にM201教室で行われた。形式としては事前に作成していたスライドを用いて、10分程度の口頭発表を行い、その後に5分ほどの質疑応答を行った。また、任意のアンケートを行った。

結果と評価

当日の質問内容としては、シュミレーションの方法や、欠測値についての質問を受けた。

発表後のアンケートの内容を「5.1　SDS成果発表会」の評価項目に分けて示す。

まず、研究内容について評価について示す。アンケートには「3Dシミュレーションを活用して高校生では実験できないようなことも実験できていてとてもおもしろかった」「翼の形状という内容を元に航空機の特性についての内容を良く知れた」など好意的な意見が多かった。

次に、研究の方法についての評価について示す。アンケートには「3Dソフトを使って検証するという考えが新しくて驚いた」「実験が上手くいかなかったためシミュレーションに切り替えるという、柔軟な対応が良いと思った」などシミュレーションを用いたことについてのコメントが多かった。今後の研究方法などに活かしていきたい。

最後に発表についての評価について示す。アンケートには「実験に用いたモデルを使って説明してるのが分かりやすくて良いと思った」「開始前に流れる音楽や視覚的に楽しいスライド、親しみのこもったリラックスできる口調などで専門的な分野を初心者にも分かりやすく説明されており、とても感動した」など理解しやすい発表が高評価だった。今後も、動画を用いたり専門的な用語の解説を多くいれることが大切である。

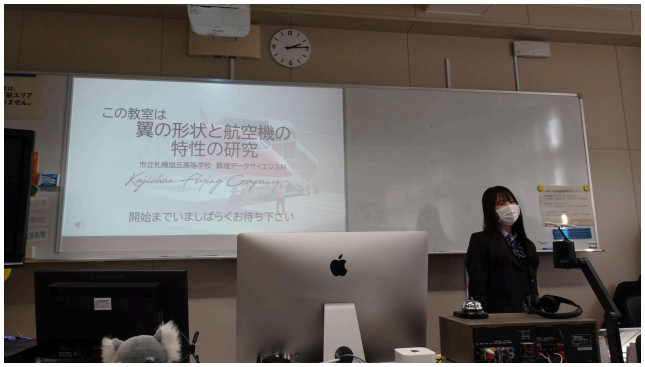


図4.2 ST・SDS発表会の様子

（文責：岡山彩夏）

第5章　終わりに

5.1　研究における個人の役割

5.1.1　井内恒之介

CFDデータの分析を行った。

（文責：井内恒之介）

5.1.2　岡山彩夏

飛行実験の際のデータの計測、3Dモデルの設計を行った。

（文責：岡山彩夏）

5.1.3　梶谷悠馬

流体解析の実行、解析時の条件設定を行った。

（文責：梶谷悠馬）

5.1.4　細川朝光

3Dモデルの設計。発射台（カタパルト）の制作を行った。

（文責：細川朝光）

5.1.5　三津知暁

シミュレーションされたデータの分析及び発表資料の作成を行った。

（文責：三津知暁）

5.1.6　山本悠悟

3Dモデル設計及びデータの分析と発表を行った。

（文責：山本悠悟）

5.2 感想

5.2.1 井内恒之介

今回、私は研究を進める上で必要な知識、技術が欠如していることを痛感しました。具体的には流体力学、適切なCFDの用い方、工作技術などが挙げられます。これらの課題を克服し、一年間で満足いく成果を挙げるには、自分たちの現在地点を把握し、無理のない研究内容、計画を立てる必要があったと思いました。また、翼が使用される環境、翼に求める性能をチーム全体で正確に共有することが出来ていなかったため、研究に遅れが生じました。早期の段階でレイノルズ数等の重要な値を定めるべきだったと思います。背伸びしすぎて今回は少し手痛い目に会いましたが、大学では、今回独力では理解できなかったような学問を体系的に学び、より有意義な研究ができるようになりたいです。また、学問研究の難しさや、数値計算の限界、実験の重要性などを垣間見ることができました。今回、協力いただいた先生方に感謝申し上げます。

（文責：井内恒之介）

5.2.2 岡山彩夏

私がこの研究活動をする中で学んだことは計画性や見通しを持つことと、自分の意見を伝えることの大切さです。今回私たちは発表会直前に研究のまとめを始めて、前日の放課後まで活動をしていました。しかし時間が不十分だったので、発表は自分たちの納得行くものではありませんでした。そのため一年間で学んだことを生かして今後大学などで研究するときは、余裕を持った現実的な計画を立て、研究を進められるようにしたいと思いました。そして、グループで話し合いをしているときに受け身になって流れに任せていたり、仕事を頼まれるのを待っていることが多かったので、これからはグループの一員として責任を持って自分の意見を持ち、伝えられる人になりたいと感じました。

（文責：岡山彩夏）

5.2.3 梶谷悠馬

今回の研究では、なかなかうまくいい結果が出ないなどのいくつもの問題点などがありました。当初の予定ではラジコンの作成を目標としていましたが、翼の形を決めることがまず第一に大切だと判断し翼型の研究をすることにしました。効率の良い翼型を調べようと、まず紙の飛行機を使い飛ばしましたがうまく飛ばずシュミレーションにて計測する方向へと変わりました。しかし変更するタイミングが遅くなってしまい十分な計測を行うことができなくなってしまったりしました。その事から私は実験がうまくいかない場合にはとても長い間同じことをし続けるのではなく、他の方法を探してもしもの時にも備えることがとても大切だと気づきました。

（文責：梶谷悠馬）

5.2.4 細川朝光

今回の研究では、計画通りに実験が進みませんでした。当初の計画では、実際の機体を用いて実験をすることになっていましたが、実際に機体を作成して飛ばしてみると思っていたよりも上手く飛びませんでした。そこで僕た

ちはシュミレーションソフトを使って実験することにしました。僕はこの経験から、研究の計画を立てるときには一つだけの計画だけではなく、いくつかの手段を用意しておくことが必要だと学びました。いくつかの手段を用意しておくことで、一つが失敗したときにすぐに別の方法で研究を進めることができるので、研究が滞ることがありません。今後、研究をする機会があれば、今回の発見を活かして円滑に研究を進めていきたいと思います。最後にこの研究に協力してくださった先生方に、感謝申し上げます。

（文責：細川朝光）

5.2.5　三津知暁

私はこの研究を通して、試行錯誤の大切さを学びました。実際に飛ばなかったときにもシミュレーションで行ってみるなど、いろいろな手を考えることが成功への近道なのではないかと感じました。また、全体を見通さずに計画性を持たず実験を繰り返すのはよくないと思いました。なので失敗した時はどこが悪かったのか、どのように改善したら良いのかを考えてから実験することが大切だと思います。
PPDACサイクル（Problem→Plan→Data→Analsys→Conclusion）を適切に回すことによって効率的に質の高いデータを求めることが可能なのではないかと考えました。最後に研究への助言を下さった、阿部先生に感謝申し上げます。

（文責：三津知暁）

5.2.6　山本悠悟

私はこの研究を通して学んだことは2つあります。一つはさまざまな考え方を持つことです。最初は模型を作りそのまま研究していく予定でしたが、思うような結果を得ることができませんでした。しかし、シミュレーションという形で現実では難しい状況を再現し、なんとか考察に至ることができる結果を得ることができました。このように、予定していたことが全くできなくても、他の方法を考えることで結果を出すことが大事だと感じました。もう一つは計画性を持つ事の重要さです。ただどの時期に何をやるというだけでなく、今回のように予定していたことが全くできなくなった時、代わりにどうするかということを考えておく必要があると感じました。最後に、今回の研究に協力してくださった先生方に感謝申し上げます。

（文責：山本悠悟）

参考文献

[1]火星探査航空機主翼翼型の多目的最適設計探索とクラスタ分析を用いたデータマイニング
https://core.ac.uk/download/pdf/147426067.pdf

[2]揚力分布の例―3
http://www.ifs.tohoku.ac.jp/edge/MOGA/file2.pdf

[3]鳥の飛行性能に関係ある形態上の統計値
https://acrobat.adobe.com/id/urn:aaid:sc:AP:729fbef7-2a6c-460c-8bc2-18e50917af1e

[4]低レイノルズ数における翼の平面形空力特性の実験的研究
https://www2.akita-nct.ac.jp/libra/report/44/44042.pdf

[5]熱流体解析の基礎
https://www.cradle.co.jp/media/column/a247G

[6]3次元流体シミュレーションソフトウェア『Flowsuare+』
https://fsp.norasci.com/