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

風力発電におけるプロペラの最適解

班番号

5

班名

Renergy

班員名

阿部 匠登 / Abe Takuto

遠藤 玲奈 / Endo Rena

及川 姫奈 / Oikawa Hina

指導教員

大宮 祐男

坂庭 康仁

目次

【概要】 2
1.1　研究の背景 3
第2章　実験方法 4
2.1　実験に使用した機材 4
2.2　実験準備 4
2.3　実験内容 6
2.3.1　実験A 6
2.3.2　実験B 6
2.3.3　実験C 6
第3章　結果と考察 7
3.1　結果 7
3.2　考察 10
3.3　課題と展望 11
参考文献と資料 11
参考文献 11
資料（設計図） 12
第4章　発表報告 14
4.1　校内発表会 14
4.1.1　SDS成果発表会 14
4.1.2　ST・SDS発表会 15
4.2　外部発表 16
4.2.1　海洋教育フォーラム 16
4.2.2　数理工学コンテスト 16
第5章　終わりに 17
5.1　研究における個人の役割 17
5.1.1　阿部匠登 17
5.1.2　遠藤玲奈 17
5.1.3　及川姫奈 17
5.2　感想 18
5.2.1　阿部匠登 18
5.2.2　遠藤玲奈 18
5.2.3　及川姫奈 18

【概要】

私たちは再生可能エネルギーである風力発電に着目し、３つの実験を行った。

1. ブレードの重心と発電量の関係を調べる実験：ブレードの重心と発電量には関係があり、重心が中心付近にある時が一番発電効率が高いことがわかった。
2. 重心位置と風速と発電量の関係を調べる実験：風速が大きくなるほど重心が中心にある時の方が発電効率が高いと判明した。
3. 羽根の重さと発電効率を調べる実験：ブレードの質量と発電量は相関関係があることがわかった。

キーワード：風力発電、重心、発電効率

（文責：遠藤玲奈）

【Abstract】

We focused on wind power generation as a renewable energy source and conducted three experiments.

1. Experiment on the Center of Gravity and Power Generation: The first experiment investigated the relationship between the center of gravity of the windmill blades and the amount of power generated. The results showed a significant relationship, with the highest power generation efficiency occurring when the center of gravity was at the center of the blades.
2. Experiment on Center of Gravity, Wind Speed, and Power Generation: The second experiment examined the relationship between the center of gravity location, wind speed, and power generation. It revealed that as wind speed increased, power generation efficiency also increased, provided the center of gravity was at the center of the blades.
3. Experiment on Blade Mass and Power Generation: The final experiment explored the relationships between the mass of the blades and the amount of electricity generated by the windmill. The results indicated a correlation between blade mass and power generation, with the specifics of this relationship requiring further investigation.

Key word: wind-power generation, the center of gravity, the power generation efficiency

（文責：遠藤玲奈）

第1章　はじめに

1.1　研究の背景

現在、日本の１人あたりの電力消費量は、中国、アメリカ、インドに次いで世界第４位という高い水準にある[1]。一方で、2020年度のエネルギー自給率はわずか11.3%[2]と、先進国の中でも特に低い水準だ。つまり、日本は発電のために必要なエネルギー資源のほとんどを輸入に頼るという、非常に厳しい状況に立たされている。

この状況に対し、私達は再生可能エネルギーがさらに重要になると考えた。再生可能エネルギーの中でも、風力発電は、燃料コストがかからず、二酸化炭素の排出がないことに加え、同じ再生可能エネルギーの太陽光発電とは異なり昼夜問わず発電でき、資源に限界がないことに気がついた。このことから、風力発電の発電効率の研究を志した。この研究を進めることには、主に２つの利点がある。まず、エネルギー自給率の向上に直結する。これは、国や地域が自身のエネルギーを生産する能力を高め、エネルギー供給の安定性と自主性を強化することを意味する。次に、輸入エネルギーへの依存度を軽減できる。これにより、外部のエネルギー市場の変動や政治的な不安定性からの影響を最小限に抑えることが可能になる。

この研究を進めるにあたって、静岡県立沼津西高等学校自然科学部による「風力発電における羽根による発電効率の変化」[4]という有益な論文を参照した。この論文は、風力発電の効率における羽根の要素の影響を調査している。具体的には羽根の幅、厚み、面積等の特性による発電効率の違いを探究している。その結果、これらの要素による発電効率の違いはほとんどないという結論が報告されていた。また、現在の風力発電に使われている大型プロペラ風車の設計思想は、抗力になりうる翼面積を減らし、回転数（速度）を上げることで発電効率を高めようとしている[3]。

そこで私達は先行研究で触れられていない重心に着目して研究を進めて行こうと考えた。これにより、風力発電の需要もさらに高まると考える。

(文責：遠藤玲奈）

第2章　実験方法

2.1　実験に使用した機材

設計ソフト(Fusion360)、3Dプリンター(Adventurer 4（**FFA-104**）)、フィラメント（PLA樹脂）、扇風機、風速計、電流計、電圧計、抵抗器(50Ω)、発電モーター、導線、実験用スタンド、1m定規、おゆまる（プラスチック粘土）、ポット、瞬間接着剤

(文責：及川姫奈)

2.2　実験準備

1) 設計ソフトを使用して縦20mm、横100mm、厚さ5mmの直方体を基準に中の密度などを変え、５種類のブレードを設計した。質量が7.54gで軸を内側としたときに重心の位置が外側から40mm(outside)、51mm(center)、62mm(inside)にある３種類と、重心がcenter(51mm)で質量が4.89g(light)、10.18g(heavy)の２種類である（表1）＊設計図は**参考文献と資料**部分に掲載。以上の設計データを3Dプリンターで印刷した。

名前	重心の位置	質量
outside	40mm	7.65g
center	51mm	7.65g
inside	62mm	7.65g
light	51mm	4.89g
heavy	51mm	10.18g

表1　ブレードの設計数値

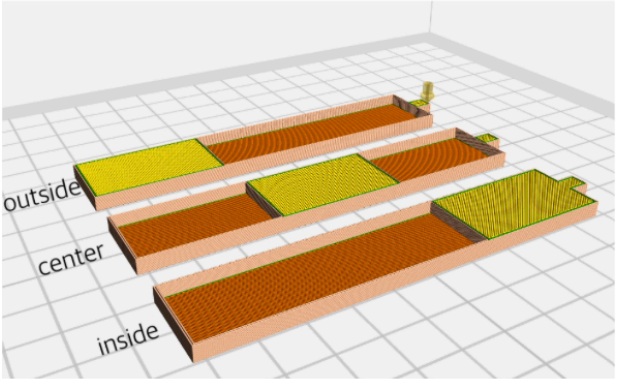


図1　重心の位置の様子（黄色い部分が密）

2) ブレードと発電モーターをつなぐプロペラの軸をおゆまるくんで制作した。設計ソフトでブレードの角度が水平から25°になるように型を設計、3Dプリンターで印刷した。その型を使用しておゆまるくんを整形し、軸の形にした。

3) ブレード３枚と軸を瞬間接着剤で接着し、プロペラを作成した（図2）。

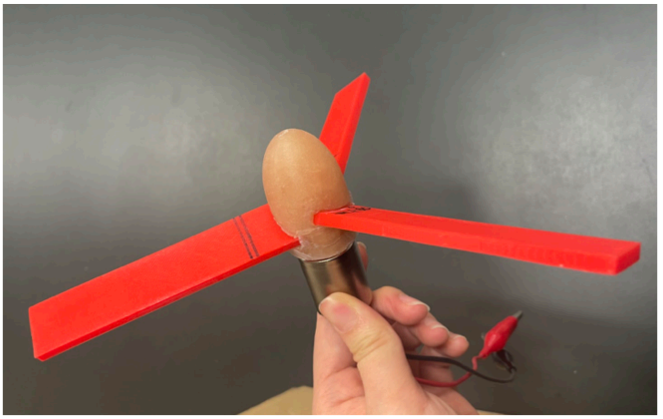


図2　プロペラ

4) 扇風機からの距離を50cmで固定し、既存の設定である弱、中、強のそれぞれの風速を計測した。また、弱と中の風速の差が大きいと考えたため、中のときに扇風機からの距離を変え、弱と中の間の風速を探した。それぞれの風速は表2のようになった。

設定	風速	扇風機からの距離
弱	2.2m/s	50cm
中	4.0m/s	120mm
中	4.2m/s	100mm
中	4.8m/s	50cm
強	5.6m/s	50cm

表2　風速

5) 実験装置を図3のように組み立てた。

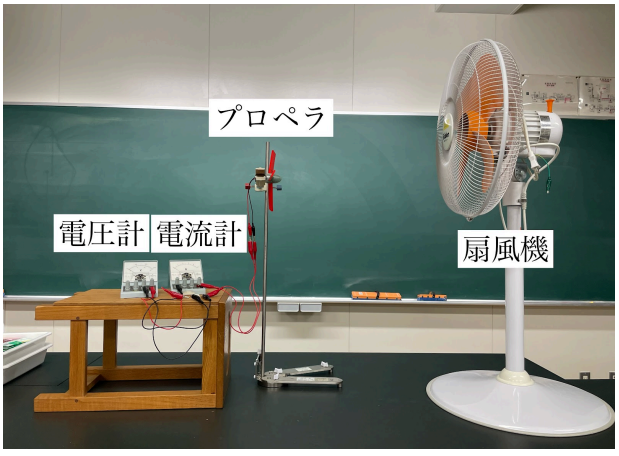


図3　実験の様子

(文責：及川姫奈)

2.3　実験内容

2.3.1　実験A

〈目的〉
重心の位置と発電効率の関係について調べる。
〈仮説〉
外側に重心があるほうが発電効率が高い。
〈内容〉
風速を強で固定しoutside、center、insideの重心の違う３種類のプロペラで発電量をそれぞれ５回ずつ計測した。

(文責：及川姫奈)

2.3.2　実験B

〈目的〉
それぞれの発電量が風速の変化に左右されるのかを調べる。
〈仮説〉
風速によって重心の最適な位置が変化する。
〈内容〉
風速を５段階に増やし、実験Aと同じく重心の違う３種類のプロペラで発電量をそれぞれ５回ずつ計測した。

(文責：及川姫奈)

2.3.3　実験C

〈目的〉
質量によって発電効率は変化するのかを調べる。
〈仮説〉
質量は発電効率に影響しない。
〈内容〉
風速を弱、中、強の３段階で、light、center、heavyの質量の違う３種類のプロペラで発電量をそれぞれ５回ずつ計測した。

(文責：及川姫奈)

第3章　結果と考察

3.1　結果

以下の結果は、５回行った実験の平均を比較している。

〈実験A〉
３種類の中でcenterが最も発電効率が高かった。しかし、発電量に有意差は見られなかった。
（t検定：p>0.05)

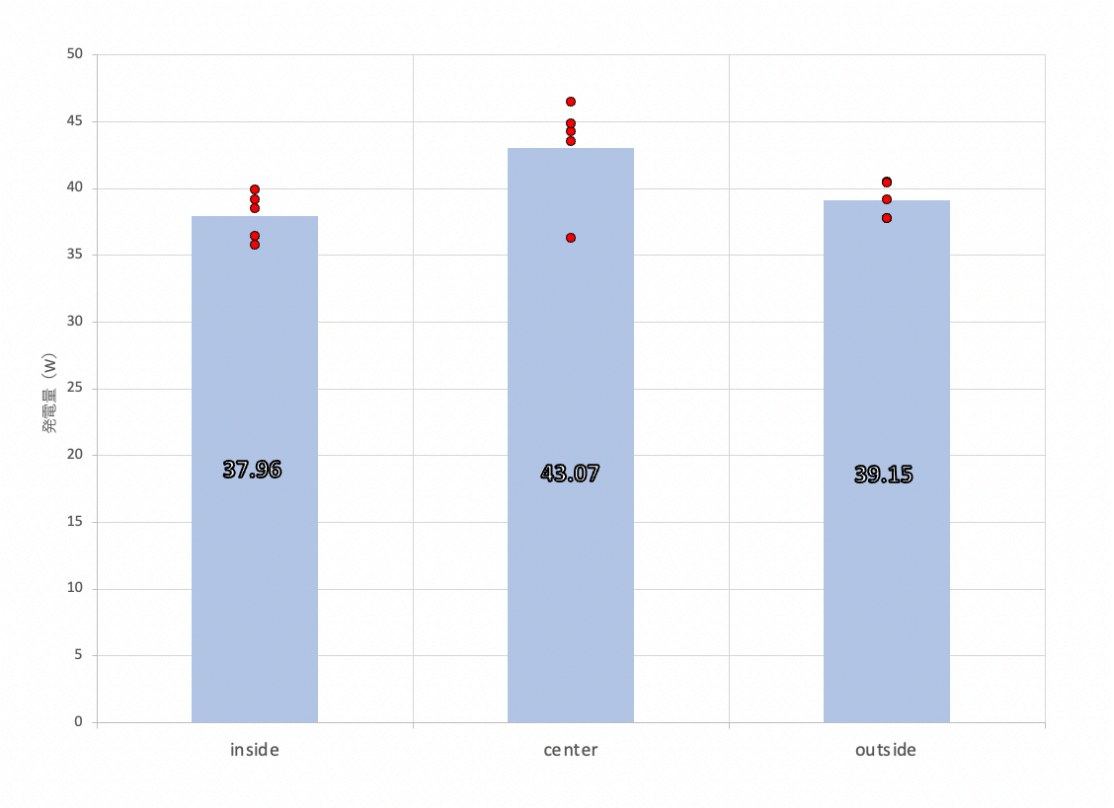


図4　重心の位置と発電量の関係

〈実験B〉
　３種類すべてのプロペラにおいて、風速が大きくなるに連れて発電量が大きくなった。また、4.0m/sまでの風速では３種類での発電量の差は大きくないが、4.8m/sのとき、発電量に有意な差が認められ、centerが最も多い発電量であった。（t検定：$p<0.05$)

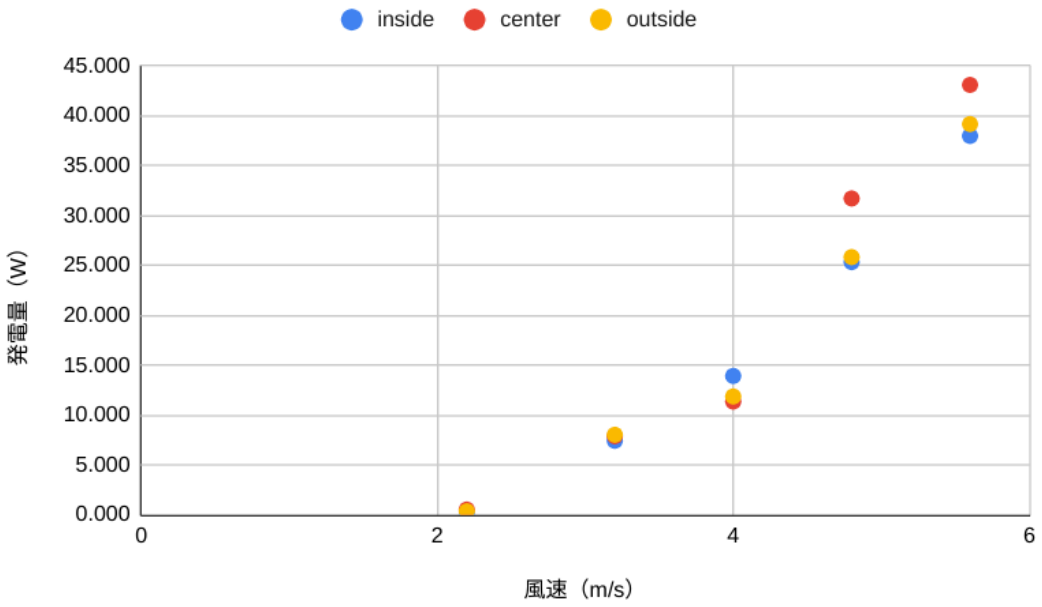


図5　重心の位置と風速の変化による発電量の変化

〈実験C〉
　質量の違いによる発電量の違いが現れた。また、どの風速においてもcenterが最も発電量が大きかった。　（t検定：$p<0.05$)

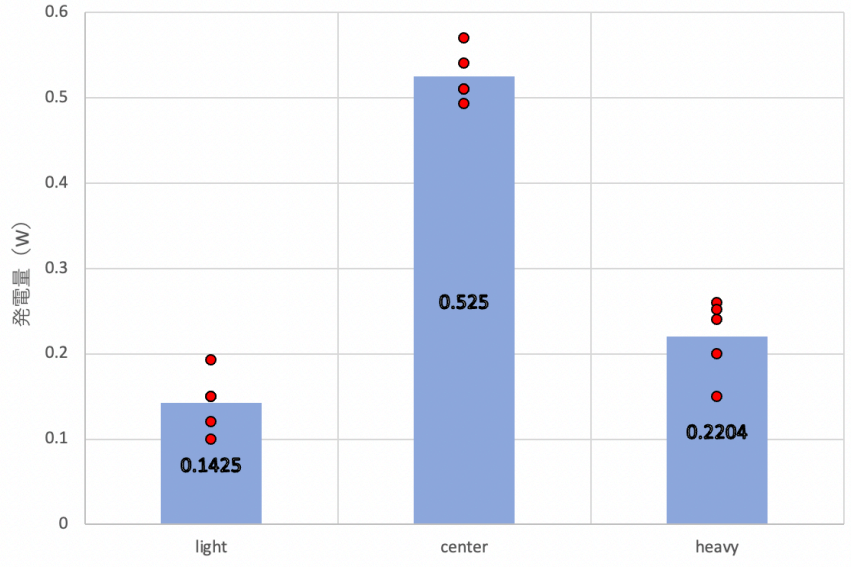


図6　質量による発電量の変化（風速：弱2.2m/s）

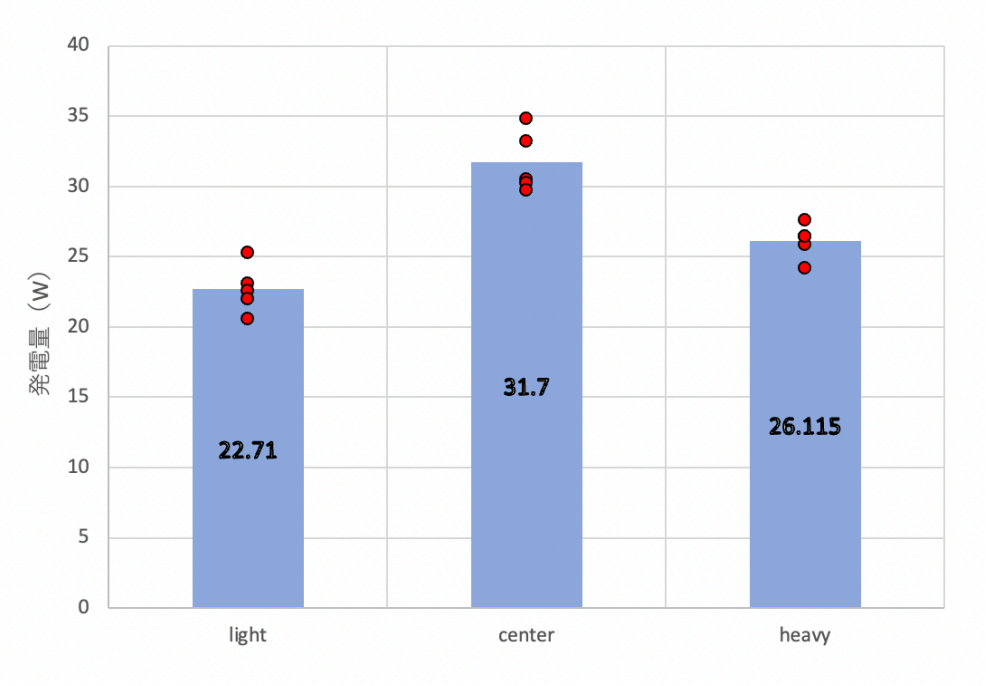


図7　質量による発電量の変化（風速：中4.8m/s）

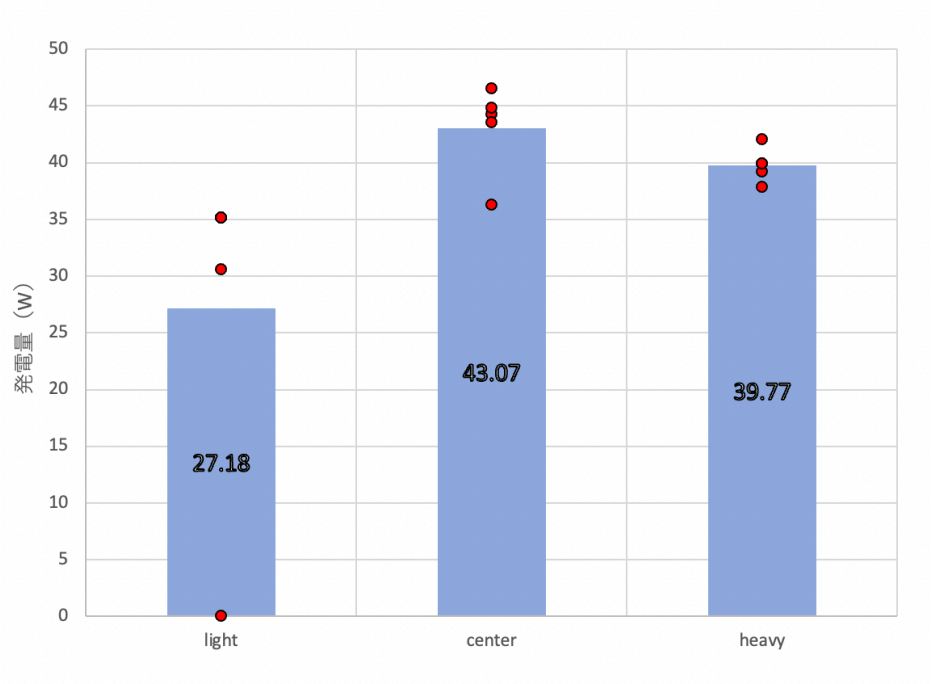


図8　質量による発電量の変化（風速：強5.6m/s）

(文責：及川姫奈)

3.2　考察

プロペラが回転するときプロペラにかかる力は主に、風による力のモーメントと空気抵抗、慣性モーメントの３つが挙げられる。以下の３つの式を踏まえて重心の位置による影響を考えた。

（式1）モーメント[N･m] ＝ 力の大きさ[N] × 軸からの距離[m]
（式2）空気抵抗[N] ＝ 比例定数 × 物体の速度[m/s]
（式3）慣性モーメント[N] ＝ 物体の質量[g] × (軸からの距離[m])^2

centerが最も発電効率が高かった理由は、風によるプロペラを回す力のモーメントから空気抵抗と慣性モーメント（回りにくさ）を差し引いた力が最も大きくなるからであると考えられる。insideは風が与える力のモーメントが小さいためうまく回転しなく、outsideは風が与える力のモーメントは大きくなるが、それと同時に慣性モーメントと空気抵抗も大きくなるため回転しにくいと推察できる。

そして、下図のように重心の位置による変化をグラフにすると山なりになることから、重心が端にあるほど発電効率が高くなるということでは無く、center（つまり重心の位置が51mm）よりも発電効率が高い位置が周辺にあるのではないかと考えられる。

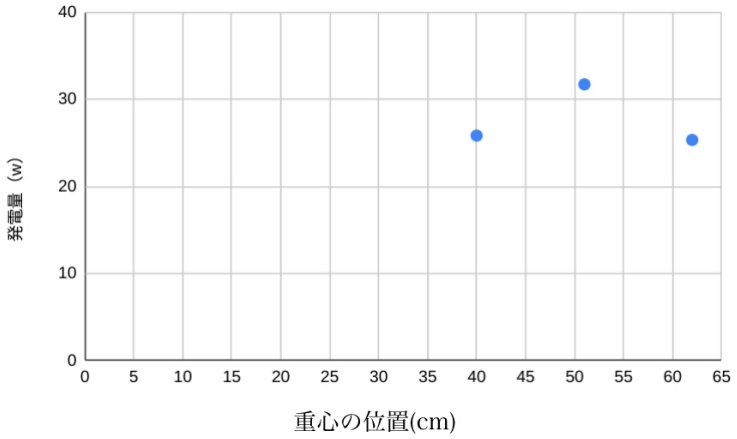


図9　重心の位置による発電量の変化（風速：中4.8m/s）

また、重心を変えることで発電効率を高めるためには、一定の風速を超える必要があると考えられる。そして重心の位置、質量ともにプロペラの形に合っている、つまり発電効率が最も高くなる一定の数値が存在しているのでは無いかと推測出来る。

(文責：及川姫奈)

3.3　課題と展望

実際の風車のブレードと今回作ったブレードとではどれだけの誤差が生じるのか、そして今回の結果を現実に応用できるのかを調べることが現段階での課題となっている。そして実際に使われているブレードの性質はその土地の風の特徴によって変化しているのかということも調べていきたい。

今回の実験では、重心の位置に大きな差がなかった。また、重心の位置と質量の違うプロペラをそれぞれ３種類しか用意できなかったため、サンプル数の少ない実験となった。したがって、今後は重心や重さの違うプロペラをたくさん作り、実験を行いたい。そして、比較する差の値が大きなプロペラで詳細なデータを多く集め、最も発電効率の高い重心と質量を数値として表したい。そして、最終的には、それらを利用して今回作成した四角形以外の形にも挑戦し、最適なプロペラの形を見つけたいと考える。

(文責：及川姫奈）

参考文献と資料

参考文献

[1] 関西電力ホームページ

https://www.kepco.co.jp/energy_supply/energy/nowenergy/japan_energy.html

[2] 資源エネルギー庁ホームページ

https://www.enecho.meti.go.jp/about/special/johoteikyo/energyissue2022_1.html

[3] 株式会社グローバルエナジーホームページ

https://www.globalenergy.co.jp/windpower.html

[4] 「風力発電における羽根による発電効率の変化」平成30年度、静岡県立沼津西高等学校、自然科学部、２年

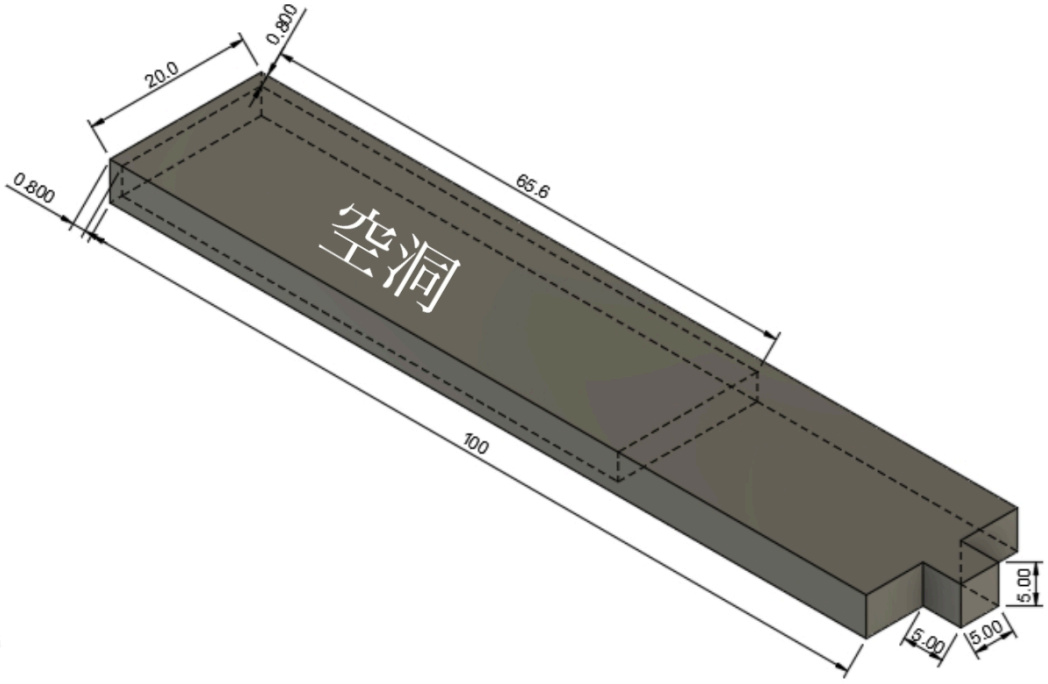
https://gakusyu.shizuoka-c.ed.jp/science/sonota/ronnbunshu/h30/183075.pdf

[5]「発電効率の良い風力発電のプロペラ形状の考察」令和2年度、大阪府立高津高等学校

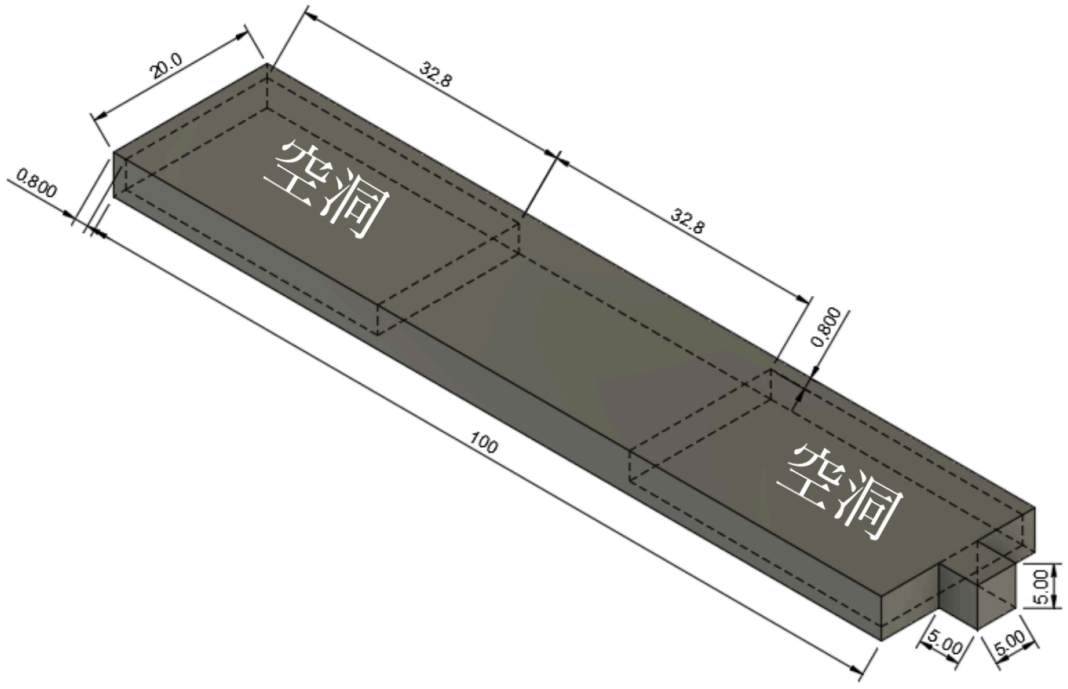
https://kozu-osaka.jp/cms/wp-content/uploads/2020/11/4d9442ddd9b566242b7ab56534cc62b5.pdf

(文責：及川姫奈）

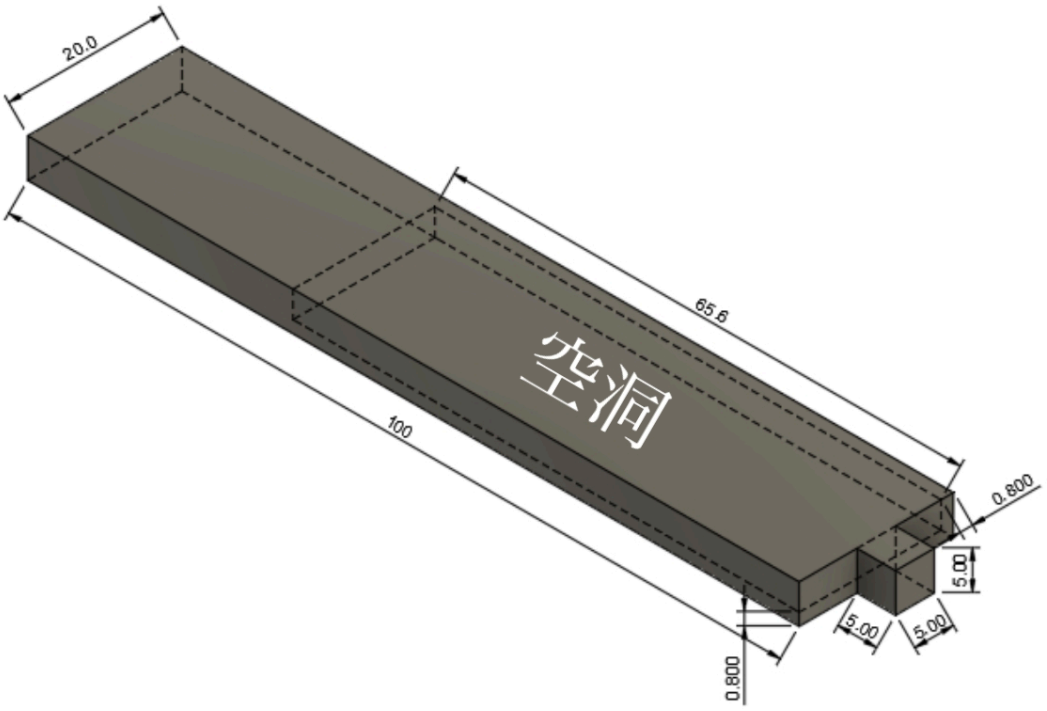
資料（設計図）



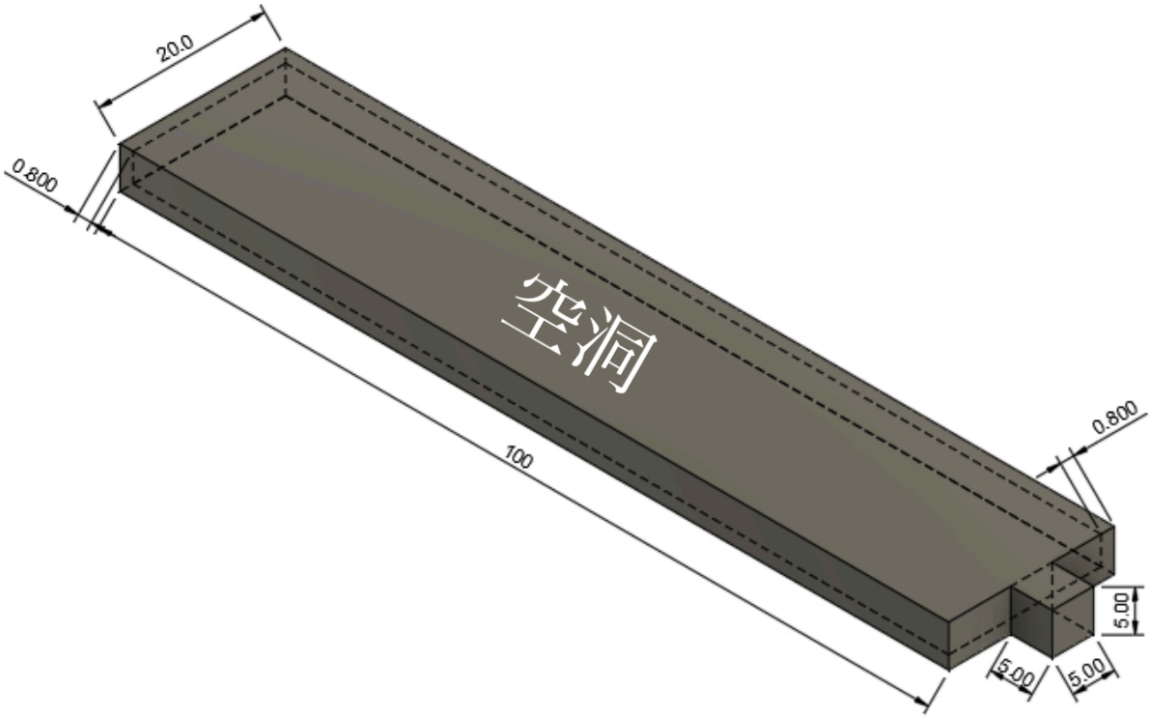
資料1　inside（重心：62mm 重さ：7.65g）



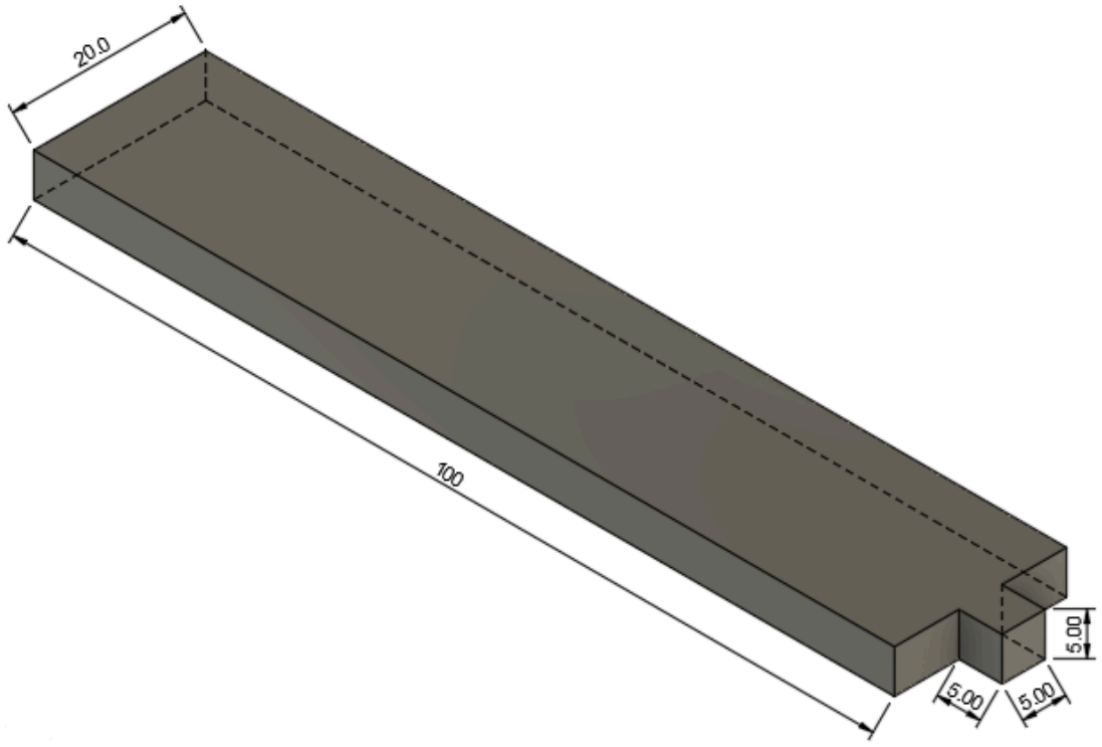
資料2　center（重心：51mm 重さ：7.65g）



資料3　outside(重心：40mm 重さ：7.65mm)



資料4　light(重心：51mm 重さ：4.89)



資料5　heavy(重心：51mm 重さ：10.18g)

(文責：及川姫奈）

第4章　発表報告

4.1　校内発表会

この項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。

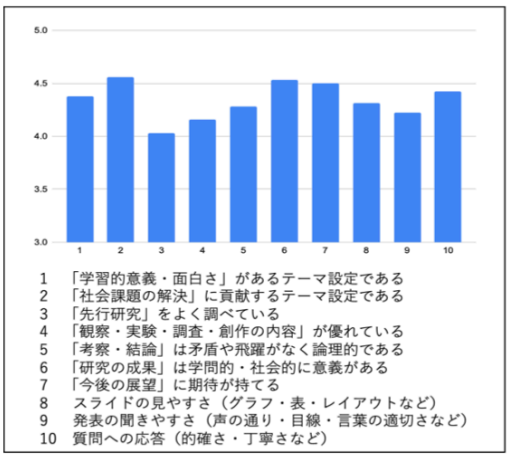
4.1.1　SDS成果発表会

概要

2023年12月6日水曜日に行われ、形式としては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るという流れであった。

本プロジェクトではスライドを用いた10分程度のプレゼンテーションを行い、その後5分程度の質疑応答を行った。また、本プロジェクトはC328教室で行った。

結果と評価



評価アンケート詳細

当日の質問内容としては、発電量とプロペラの回転数の関係についてや、ブレードにかかる力の計算方法についての質問等を受けた。

また、評価アンケートの回答者数は32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。全て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記す。評価点の平均は、4.47であった。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は4.56と高かったが、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4.38であった。このことから、より学問的意義・面白さをわかり易く主張していくことが必要である。

次に、研究の方法についての評価について記す。評価点の平均は4.30であった。先行研究をよく調べているという項目の平均点が4.03で他の評価点に比べ低い。先行研究でわかったことや、参考にした先行研究などをしっかりと伝えることが必要であるといえる。

最後に発表についての評価について記す。評価点の平均は4.32であった。声の聞きやすさの評価が一番低く、評価点の平均は4.22だった。はきはきと聞き取り易い声で話すことが必要である。

(文責：阿部匠登)

4.1.2　ST・SDS発表会

概要

2024年2月6日火曜日に行われ、形式としては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るという流れであった。

本プロジェクトではスライドを用いた10分程度のプレゼンテーションを行い、その後5分程度の質疑応答を行った。また、任意のアンケートを行った。本プロジェクトは物理教室で行った。

結果と評価

当日の質問内容としては、研究の流れや、我々の定義方法に関する質問を多く受けた。発表後のアンケートの内容を「5.1.1 SDS成果発表会」の評価項目に分けて示す。

まず、研究内容について記す。アンケートには「今後重要視されていく再生可能エネルギーに着眼点をおいていて素晴らしかった」など好意的な意見が多くあり、良いテーマだという評価であると言える。

次に研究方法について記す。「しっかり対照実験を行ない比較されていて、分かり易かった」「様々な視点から効率の良い形を研究していて良かった」など好意的な意見と、「もっと現実的なシチュエーションでやると良いと思った」「素材を変えるなど、もっと様々な実験をできていればよかった」「もっと詳細な値で示してほしい」など、実験結果の正確さや、更に多くの視点での研究をすべきだという内容が多かった。今後の研究方法と研究内容に積極的に活かしたい。

最後に発表についての評価を記す。「グラフが見やすかった」「実験に使用したものの実物を用いていてわかり易かった」など、目で見てわかることが高評価であった。そのため、これからも見せながら説明することを大切にするべきである。

(文責：阿部匠登)

4.2　外部発表

この項では校外で行われた海洋フォーラムでの発表と、理数数学コンテストの概要と結果、その評価を行う。

4.2.1　海洋教育フォーラム

概要

公益社団法人日本船舶海洋工学会海洋教育推進委員会主催の海洋教育フォーラムinHokkaidoが2024年12月9日土曜日に函館で行われた。形式としては事前に作成していたスライドを用いて発表を行い、その後に質疑応答が行われるという流れであった。

本プロジェクトではスライドを用いた7分程度のプレゼンテーションを行い、その後5分程度の質疑応答を行った。

結果と評価

当日の質問内容はブレードの設計方法と、結果に至るまでの計算式の質問であった。コメントとしては、「将来にとってとても意義のある研究であった」「もっと研究方法を突き詰めるとよい」という意見があった。

(文責：阿部匠登)

4.2.2　数理工学コンテスト

概要

武蔵野大学工学部数理工学科主催のコンテストで、A4判縦長用紙に横書きで８枚以内の論文を提出するという方式であった。テーマは「数学や物理などの数理的な考え方を用いてモデル化を行い、対象や問題の性質を説明する」「統計的なデータ分析を行い、問題を解決するための有益な情報を取り出す、あるいは興味深い解析結果を導く」の２つである。本プロジェクトは、A4判８枚の提出を行った。

結果と評価

本プロジェクトは選考委員賞を受賞した。

対照実験を行い、中心に重心がある場合に一番発電効率が高いことを見出したことが評価された。評価された具体的な内容は「ブレードの重心が中心にある場合が一番発電効率が良いことを、実験的に見出している。ブレードの重心を変える実験装置を工夫した事が素晴らしい」「プロペラの重さに対する発電効率に関して、実験考察がなされている点が、課題へのアプローチとして大変良い」「３Dプリンターでブレードを作成する際に印刷品質の比較を行い、実験条件をできるだけ揃えようとしている点も良い」という実験方法に対する評価であった。今後の展望としては、「負荷の接続など発電量に対する実験設定の見直しを行い、時間をかけて考察を行うと良い。特に、剛体の力学に対する理解を深め、今回の結果に対する考察を深めると良い。また、羽の形状を変えてみるなど、実験を発展させられる可能性も考えられる」というような知識を深めさらに良い考察にすることについての評価であった。

(文責：阿部匠登)

第5章　終わりに

5.1　研究における個人の役割

5.1.1　阿部匠登

３D設計ソフトやスライサーソフトを用いて、実際にプロペラを設計し、３Dプリンタの調整を行い正確な実験を行えるような器具づくりを行った。

(文責： 阿部匠登)

5.1.2　遠藤玲奈

データを収集し、分析を行い、次の実験をどのようなものにすればよいかを考えた。

(文責：遠藤玲奈)

5.1.3　及川姫奈

ブレードと軸の型の設計をし、プロペラを組み立てた。実験の記録をし、結果から分析し研究の考察を行った。

(文責：及川姫奈)

5.2　感想

5.2.1　阿部匠登

この研究では、研究の組み立て方について多くのことを学べたと感じる。自分たちの目標をどこに設定するのか明確にし、自分たちの活動可能な時間を考慮した上で、実験の順番や内容を考え組み立てていかなくてはならないと分かった。また、思わぬ事故や実験の失敗などに応じて計画を素早く組み直さなくてはならないことも分かった。この実験では、見通しを上手く立てることができず、３Dプリンターで印刷している時間やおゆまるくんを固めている時間に実験が止まるということが度々起こった。限られた時間の中で、成果を出すにはこのような実験を進められないような時間を極力減らしていかなくてはならないと感じた。また、このような事柄は研究だけでなく、勉強や部活動など日常の中の様々なところで活かされるのではないかと思う。いかに効率のよい方法を考え、先見の明をもち計画を立てることが重要かを理解することができた有意義な研究であったと感じる。このような力を日々研鑽していきたい。

(文責：阿部匠登)

5.2.2　遠藤玲奈

今回の研究においては、研究を行わなければ得られなかった能力を習得し、非常に良い経験となったと感じている。先行研究を基に私たちの研究を展開する過程では、具体的な研究テーマを選び、どのような手法を用いることで最も効果的な結果を得ることができるのかという考え方を学び、その結果として、深く考える力や複雑な問題を解決する力が身についた。さらに、実験で得たデータを用いて分析を行う過程では、そのデータを理解し、それを基に次の実験計画を立てるための応用力も養うことができた。これらの経験を通じて得た能力は、今後の研究生活だけでなく、将来のキャリアにおいても大いに役立つと考えている。そのため、これらの能力を更に深め、磨き上げるために、今後も努力を重ねていきたいと思っている。

(文責：遠藤玲奈)

5.2.3　及川姫奈

今回の研究では実験に伴う下準備に多くの時間が掛かってしまったように思う。それはスケジュール管理を上手に行えていなかったからだと感じている。今後の研究活動では、今回の反省を活かし余裕を持ったスケジュールで研究を進めていきたい。また、今回のグループでの研究を通して、効率よく進めるためには役割分担が欠かせないということを学ぶことが出来た。それぞれに合った役割を担うことで進度が上がり、よりよい成果に繋がるということが分った。そして研究の目的のためにどのような実験をどのような条件で行うのが最適なのかを考える力や、実験のデータなどの結果から論理的に考察する力を習得することが出来たと感じている。これからも研究などを積み重ね、他の人の意見などを取り入れながら自分の力を磨いていきたい。

(文責：及川姫奈)