

自転車を漕いで手軽に風力発電 ～通学時のスマートフォンの充電を目指して～

Easily generate electricity by wind power while pedaling a bicycle

岡田 季也 香川 雄哉 鳥井 千永 永江 秀羽
OKADA Tokiya KAGAWA Yuya TORI Yukihiro NAGAE Shuwa

1. 要旨・概要

私たちは風力発電に興味があったのに加えて、普段の生活で自転車を使うことが多いことから、自転車を漕ぐことで受ける風で発電し、通学時にスマートフォンを充電したいと考えた(図1)。そこで、身近な材料や安価なモーターから自転車用の小型の風力発電機を製作して研究を行った。

風力発電機を自作するためには、最適なプロペラ、モーター、回路を考える必要がある。プロペラは作りやすさを重視して多翼型を採用し、大きさは自転車の前かごに収まるように計算して決定した。送風機を用いた実験と理論計算を通して、台形の羽を用いる場合、ピッチ角(回転軸に垂直な面に対する羽の角度)は15度、羽の枚数3枚が最適であると分かった。モーター1個では電圧が不十分であったため、2個直列につなぎUSBポートを取り付け、合計1,364円で小型風力発電機を製作することができた。実際に自転車に取り付けて運転すると、運転中に充電マークが約3秒間点灯していることが確認できた。しかし、バッテリー残量の数字を増加させるには至らなかった。電流が不十分であると考えられるので充電時間を延ばすために更なる改良が必要である。

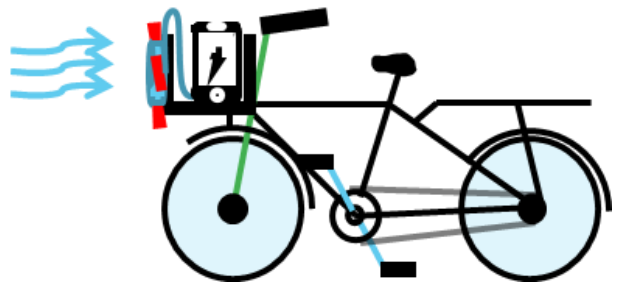


図1.自転車での風力発電イメージ図

2. 問題提起・研究目的

私たちは元々風力発電に興味があり、風力発電の技術を日常生活で応用できないかと考えていた。そこで、普段の生活で自転車を使うことが多くあり、自転車を漕いでいる最中に風を受けていることに着目した。自転車をを用いた発電といえば車輪にダイナモを取り付けての発電をまず思い浮かぶが、発電の際に負荷がかかりペダルが重くなってしまうという欠点がある。小型の風力発電機について調べてみると、キャンプや日常生活で使用可能なものが販売されており、その価格帯は5万～60万円と高価であった。そこで、安価でかつ手軽に作れる自転車用の小型風力発電機を製作しようと考えた。

風力発電の研究は1880年代から始まり、基本的なことは研究し尽くされ、今やプログラミングや最新の技術を駆使した高性能の商品も販売されているため、高校生に原理の部分で新たな発見は難しいかもしれない。しかし発電は、その目的や用途に応じて最適な装置が異なり、例えば徳島大学における先行研究は私たちと同じ水平軸型多翼型風力発電機だが、リゾート地区で調和した発電を目的としているため、プロペラの枚数は6枚と固定した条件下で行っていた。「誰でも簡単に安く作れ、自転車通学時のスマートフォン充電」を目的とした風力発電機に関する報告はこれまでにないため、実験の過程で新たな気付きがあれば、この研究の意義はある。

風力発電のプロペラの種類には大きく分けて水平軸型と垂直軸型がある。垂直軸型は自転車に取り付けて運用することが難しいことから適当でないと判断した。また、水平軸型の中でも羽に曲面をつける必要がなく、比較的製作しやすい多翼型が本研究にふさわしいと考えた。多翼型のプロペラでは、ピッチ角、羽の形、羽一枚当たりの面積、羽の枚数、素材(表面の様子)などが変数として考えられる。すべてを入力変数とすると実験の回数が膨大になってしまうため本実験ではピッチ角と羽の枚数を入力変数として扱い、それ以外を制御変数とした。またプロペラの素材には、加工しやすく軽いという点から発泡スチロールとプラスチック段ボールを採用した。

多翼型風車について、香川県立三本松高校では、東かがわでの発電を目的に研究されていた。羽の形は長方形で、最適ピッチ角は15度～20度、最適枚数は3～4枚であった。私たちは羽の面積が大きい方が風から受ける力が大きく回りやすいと考え、形状は台形に決定した。

まず予備実験として普通に自転車を漕いだ時に受ける風速を測定すると約4.2m/sであった。この風速でスマートフォンの充電に必要な電圧3.7V、電流1.0Aを出力できる風力発電機の製作を目標とし、以下の実験を行った。

3.実験方法・結果・考察

【実験1. 1】 最適な羽の枚数とピッチ角を探究する

〈目的〉羽が台形が多翼型小型風力発電機における羽の枚数、ピッチ角（図2）と電圧の関係を調べた。

〈仮説〉羽の素材や形状が変わっても先行研究と同じピッチ角15〜20度、羽の枚数3〜4枚で最大電圧となる。

〈準備物〉アーテック風力発電用モーター、プラスチック段ボール、発泡スチロール、プラスチック支持軸、送風機、物理スタンド、ティッシュペーパー、ミノムシクリップ付きリード線、インターフェイス（PS—2002）、電圧・電流センサー（PS—2115）、パソコン（PASCO Capstone というアプリケーションで電圧を計測する）

〈風力発電機の製作方法〉

- 1.発泡スチロールをスチロールカッターで円盤型に切り、支持軸を入れるための穴を開けた。
- 2.角度ごとに羽を差し込むための切れ込みを入れた。
- 3.プラスチック段ボールを台形に切った。大きさは、自転車の前かごに収まる大きさでかつ羽の最大枚数である8枚羽のプロペラを製作した際に、隣接する羽同士が重ならない大きさを計算して決定した（図2左側）。
- 4.発泡スチロールの切れ込みに羽を差し込み、布テープで固定した。
- 5.真ん中に支持軸を入れ、直流モーターのシャフトを差し込んだ。
- 6.ピッチ角10度、15度、30度の3種類、羽の枚数2、3、4、6、8枚の5種類の計15種類のプロペラを製作した。

〈実験方法〉

- 1.プロペラと送風機の距離は、4.7m/sの風を正面で受けられるように図4のように設定した。
- 2.プロペラの振動を抑えるためにティッシュペーパーでモーターを巻き物理スタンドに固定した。
- 3.モーターの端子に電圧センサーをつないだ。
- 4.プロペラに風速4.7m/sの風を当てプロペラが回り始めて4秒後から16秒間の電圧を計測した。その区間内の最大電圧と平均電圧を調べた。

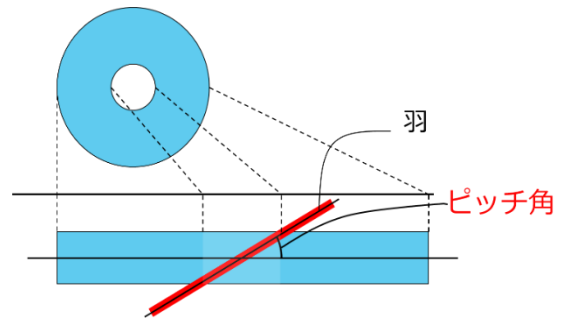


図2.ピッチ角について

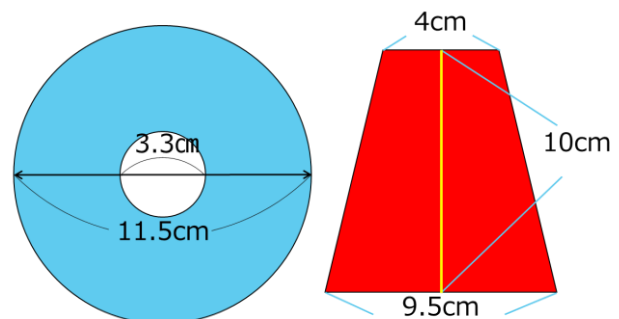


図3.プロペラの形状と大きさ

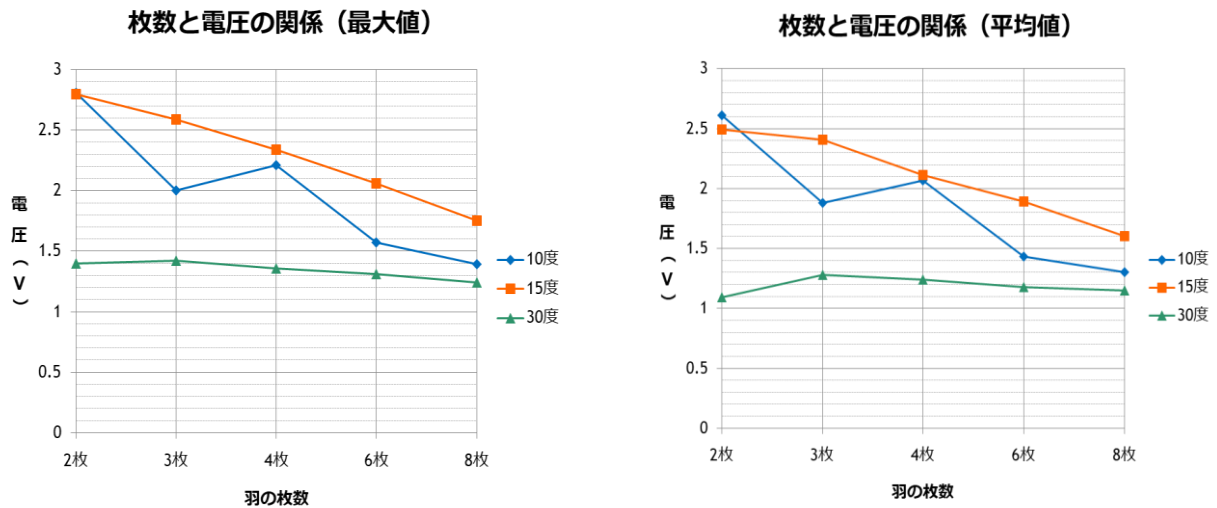


図4.実験1. 1のセッティング図

〈結果〉仮説と異なり、最大電圧、平均電圧共に、ピッチ角が10度、羽の枚数が2枚のとき最も高いことが分かる（グラフ1）。またグラフから羽の枚数が増えるほど、電圧が低下していることが読みとれる。

〈考察〉羽の枚数が増えるほど電圧が小さくなるのは、羽の枚数分の質量が増え、回転数が減少するからだと考えられる。

実験中、羽の枚数が少なくなる程、回転開始までの時間が長くなることに気づいた。自転車における発電では、信号などで止まるが多々あるため、早く回り始めることが重要であり、2枚羽は適さない。また2枚羽のプロペラは回転時のぶれが大きいため、プロペラへの負担が大きく壊れやすいと考えた。以上の理由から2枚羽を選択肢から除外し、比較的電圧の高い3枚羽を使うべきだと考えた。3枚羽ではピッチ角15度で電圧最大をとったため、15度3枚羽のプロペラがふさわしいと考えた。しかし実験1. 1は比較した角度同士の間隔が広く電圧も上下しているため、より正確に角度を求める必要があると考え、実験1. 2を行った。



グラフ1.羽の枚数と電圧の関係

【実験1. 2】 より最適なピッチ角を探究する実験

〈目的〉3枚羽において本当にピッチ角15度が最適かどうかを調べた。

〈方法〉ピッチ角をより細かく5度、10度、15度、20度、25度、30度に設定した3枚羽のプロペラを用いて、実験1. 1と同様にして電圧を測定した。角度ごとに4回ずつ実験し平均を求めた。また、同時にハイスピードカメラ(CASIO EXILMEX-ZR50)で撮影することで、1秒当たりの回転数も計測した。発電機と送風機の距離と強弱を変えて、プロペラに当たる風の強さを変化させ、回転数と電圧が比例するかどうかを検証した。

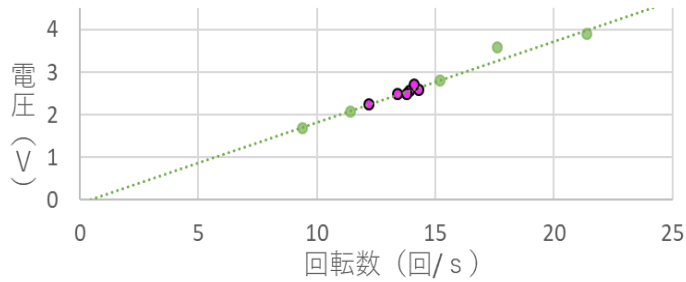
〈結果・考察〉羽の回転数と電圧は比例していることが確かめられた(表1, グラフ2の緑色の点)。各角度の回転数と電圧の平均値をグラフ2に重ねた(グラフ2の赤色の点)。各角度のデータ(赤色の点)は緑色の近似直線上にある。角度ごとの電圧の差は小さいが、その中でも最大電圧をとったのはピッチ角15度のときだった。実験1. 1と実験1. 2により15度3枚羽のプロペラが最適と結論付けた。

表1.風力を変えることで回転数を変えたときの、回転数と電圧の関係

回転数 (回/s)	電圧 (V)
9.4	1.68
11.4	2.08
15.2	2.81
17.6	3.59
21.4	3.9
21.6	3.95

表2.風力を一定にして、ピッチ角を変えたときの回転数と電圧の関係

角度(度)	回転数 (回/s)	電圧 (V)
5	13.8	2.12
10	10.7	2.39
15	13.6	2.46
20	11.4	2.23
25	11.6	2.29
30	10.6	2.1



グラフ 2.回転数と電圧の関係

【理論計算】

自転車を漕いで発電する際には、最大風速を維持することは難しく、弱い風で回り始めることがより重要である。また、実験 1. 2 を観察して羽の枚数が多い程、かつピッチ角が大きくなる程回り始めまでの時間が短くなっていることに気付いた。そこでプロペラと風をモデル化 (図 5) し、回転開始時に羽に働く力を考え、最も回り始めの力が大きいピッチ角を検討した。ピッチ角が 0 度のときの空気の粒が羽に与える単位面積あたりの圧力を F [N/m²]、羽と空気との間の動摩擦係数を μ 、羽の面積を S [m²] とした。

羽に空気の粒子が衝突したとき、羽の面に垂直にはたらく圧力は $F \cos\theta$ [N/m²]。その力のうちプロペラの回転方向 (図では上方向) の成分は $F \sin\theta \cos\theta$ [N/m²] となる。加えてプロペラが動く時の摩擦抵抗についても考えなくてはならない。空気が羽に沿って流れると単位面積当たり $\mu F \cos\theta$ [N/m²] の摩擦力がはたらき、羽の面に対して反作用がはたらく。この圧力による回転と反対方向 (図では下方向) の成分は $\mu F \cos^2\theta$ [N/m²] となる。羽を正面から見た面積である $S \cos\theta$ [m²] をかけて羽にはたらく合力を上向き正として一つの式にまとめ、 θ についての関数とみると $f(\theta) = (F \sin\theta \cos\theta - \mu F \cos^2\theta) S \cos\theta$ [N] となった (グラフ 3 の $g(\theta)$ は、 $f(\theta)$ における $F S$ の係数部分)。 μ に適当な値を代入して θ の取りうる範囲での最大値とその時の θ を求めると、ピッチ角が 35~40 度のとき回転開始時の力が最大になると分かった (グラフ 3)。グラフ 3 から実験を行った範囲ではピッチ角が大きい時の方が回転し始めやすく、10 度より 15 度の方が回転開始時の力が大きいと、15 度を用いるべきと考えられる。

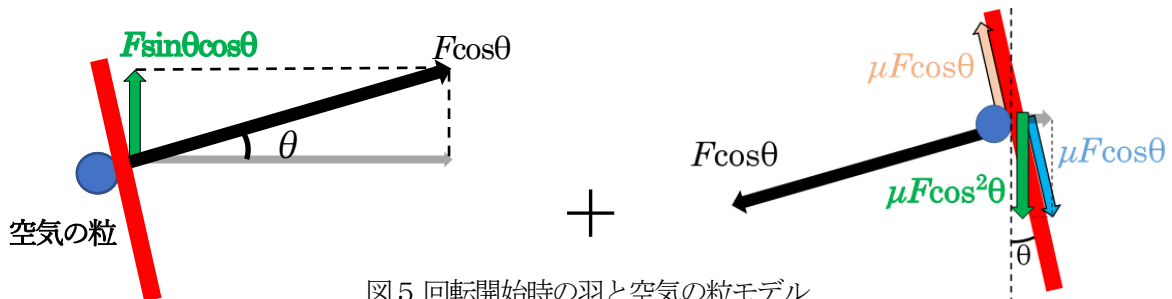
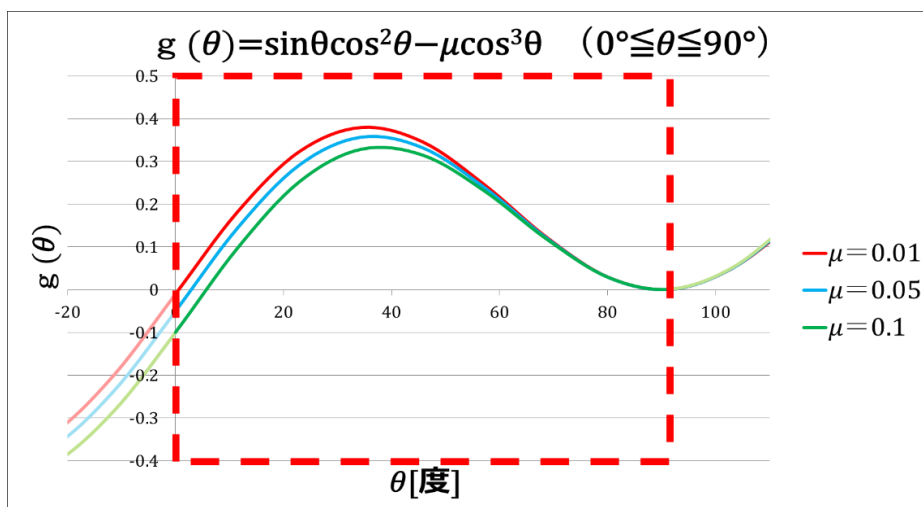


図 5.回転開始時の羽と空気の粒モデル



グラフ 3.角度と回り始めやすさの関係

【実験2】 最適なモーターを模索する

〈目的〉風からさらなる電圧を引き出すには最適なモーターが必要であるためこの実験を行った。500円以下の安価なモーターをいくつか購入し、スマートフォンの抵抗は不明であるため、いくつかの抵抗値における発電電力を比較することで、今後の実験に使用するモーターを決定することを目的とした。

〈準備物〉モーター（風力発電用モーター、アーテックモーター、マブチモーター41、マブチモーター45、マブチモーター130、マブチモーター140、マブチモーター280）、小型化したプロペラ（図6）、物理スタンド、ミノムシクリップ付きリード線、物理スタンド、電流計、電圧計、抵抗器（抵抗値0.1Ω、1.0Ω、10Ω、100Ω、1000Ω）、ティッシュペーパー

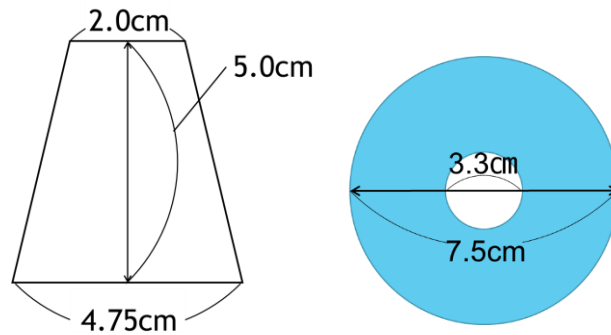


図6. 小型化したプロペラの形状と大きさ

〈方法〉実験1で得られた最高電圧は2.81Vとスマホの充電に必要な電圧に達していないため、モーター2つを直列に繋ぐことで電圧を上昇させた。自転車の前かごに2つ付けるためにプロペラを小型化した。7種類のモーターをプロペラに取り付け、モーター同士を直列につないだ（図7）。右写真のように発電機、抵抗器、電流計、電圧計を取り付け、回路を作った。得られた電流と抵抗値から電力を算出した。

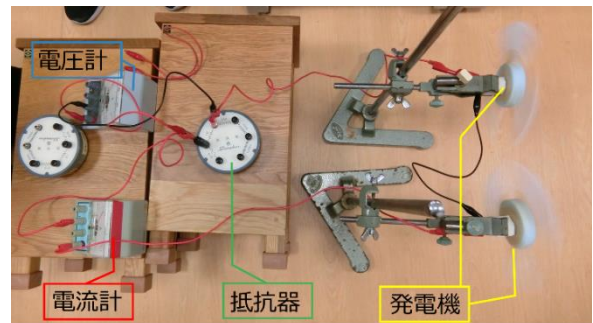
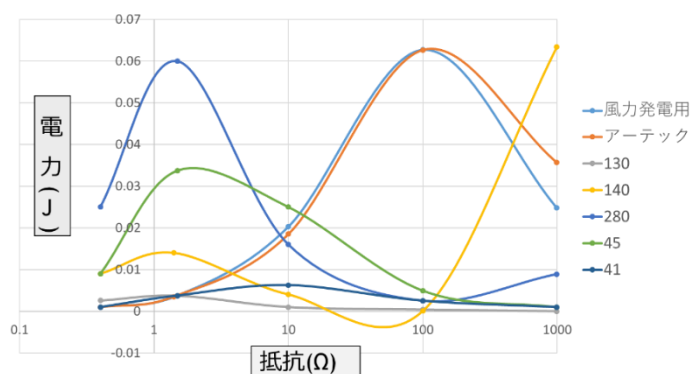


図7. 実験2のセッティング

〈結果〉グラフ4の横軸は抵抗 [Ω]、縦軸は電力 [J] である。各種モーターにおいて電力を取り出すのに最適な抵抗値が異なることが分かった。

〈考察〉直流電流であっても交流電流と似た式で表されるインピーダンスのマッチングがあることを知った。今後の実験では、大きな電圧が得られたモーターの中で、電圧が十分得られた風力発電用モーターとアーテックモーターを用いることとした。



グラフ4. 抵抗と電力の関係

【実験3】 実際に自転車を漕いで発電を試みる

〈目的〉自転車に小型風力発電機を取り付け、実際に自転車を漕いで発電しスマートフォンを充電できているか確かめる。

〈準備物〉製作した最適な風力発電機、USBポート、USBコネクタDIP化キット、Aメス、USBコネクタ（USBケーブルUSB 2.0 Type-A オス⇄Type-C オス）、ネオジウム磁石、自転車、スマートフォン（Android SH-04F）

〈方法〉モーターが丁度入る程度の大きさの穴を開けた発泡スチロールを前かごの内側に布テープで固定して、プロペラを取り付ける。ネオジウム磁石を用いてプロペラのシャフトとモーターの軸を固定する。モーターを直列につなぎ、USBポートに接続する(図8)。自転車を漕いで充電マークが点灯するか、バッテリー残量は何パーセント上昇するかを調べる。

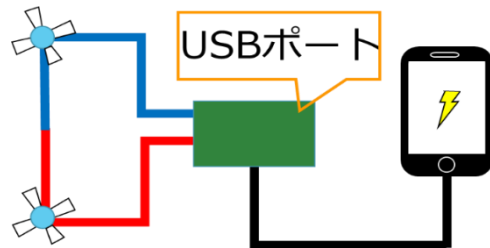


図8.実験3の回路

〈結果・考察〉自転車を漕いでいる最中に充電マークが約3秒間点灯していることが確認できたが、バッテリー残量の数字を増加させるには至らなかった。充電が長く続かなかった原因は電流不足だと考えられる。このことを解決する方法として、さらにプロペラを増やして並列回路を作り、電流を増やすことが挙げられる。実験3の後、送風機でより強い風(約7.0m/s)を当てて充電できるか調べる追実験を行った。実験3からセッティングを変えず、自転車に人がまたがった状態で、自転車の前かごの正面に送風機を置き実験をした。その結果約5Vの電圧を得られ、2分間ほど継続して充電できることが確認できた。

4. 結論

自転車用多翼型の小型風力発電機は、羽が台形の場合、ピッチ角15度、羽の枚数3枚が最適である。1,364円で小型風力発電機を製作でき、強風であれば約2分間充電マークを点灯させられた。

〈価格の内訳〉

風力発電用キット×2	1,122円	USBポート	120円	USBコネクタ	90円	
プラスチック段ボール	16円	発泡スチロール	16円			合計 1,364円

5. 今後の展望

〈プロペラ〉

- ・回転開始時だけでなく回転中に羽に働く抗力を考え、多翼型モデルを構築し、回転中の最適ピッチ角の探究をする。回転中は羽から見た風の吹いてくる向きが変わり速度も回転との合成速度になるため、抗力の大きさが変わる。また回転中は圧力差による揚力も発生するため、それについても考える必要がある。揚力を算出するためには、羽から見た風の速度と風から見た迎角の大きさから揚力係数を出す必要がある。

- ・現在の羽の形は、実験1の最大枚数である8枚羽を想定したものなので、3枚羽を使用している今、さらに羽1枚を大きくすることも可能である。しかし羽1枚の質量も増えてしまうので、モーメント計算なども用いて最適な羽の形状も追究する。

- ・多翼型よりも発電量が多いことが分かっているプロペラ型のプロペラを用いることも考えている。ただし、曲面を用いた羽を使用すると、作成難易度と費用が格段に上がってしまうため手軽さとの両立は難しいと思われる。

〈モーター〉

- ・現在は実験2の結果から風力発電用モーターを使っているが、今後はより回転しやすいボールペアリング型のモーターを使う。ボールペアリング型のモーターは、回転軸のまわりに玉などの転動体があり他のモーターと比べ、接触面積が少ないため高速回転に適している。また接触面積が少ないことで、回転元への負荷が軽減できる。

〈回路〉

- ・現状、電流不足により充電ができていないと考えられる。漕ぎ始めやゆっくり漕いだ時など弱い風でも発電できるように、また、充電時間を延ばせるように改良する。具体的には、現在の回路に加え、モーターをさらに2つ並列繋ぎにして電流を増やすことを考えている。

- ・スマートフォンにはリチウムイオン電池が使用されており、過剰に高い電圧が加わると危険であるため、規定値を超えると降圧する、降圧型DC/DCコンバーターを回路に組み込む。

6. 参考文献

太田知那・岡良行・松本直樹・森大明.『風力発電の研究～東かがわでの風力発電に向けて～』生徒課題研究論文集 第2号 2007.3 香川県立三本松高校

松宮輝・青木繁光・飯田誠.『図解 風力発電のすべて』.工業調査会.2005年,167ページ

河村哲也.『エネルギーと風車』.インデックス出版.2003年,118ページ

牛山泉.『風力エネルギーの基礎』.オーム社.2005年,263 ページ
長谷川靖洋.『エネルギー変換工学 風力発電』.埼玉大学.
鈴木茂行『多翼型風力発電システムの特性』.徳島大学.

7. 謝辞

本研究を進めるにあたり, 高松第一高等学校 教諭 本田 一恵先生, 四国電力送配電の高木さんをはじめ多くの先生方にご指導ご鞭撻を賜りました。ありがとうございました。