

風力発電における羽根による発電効率の変化

静岡県立沼津西高等学校

自然科学部 2年 檜木大介 他3名

1 研究の動機と目的

私たちは、災害時に停電により生活が不便になる可能性を考え、沼津西高校に面した千本浜海岸での風力発電を思いついた。

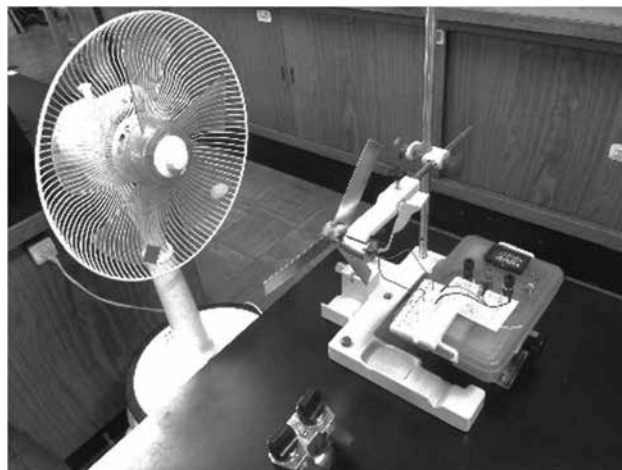
そこで、どういった羽根ならば、発電量が大きくなるのかを調べようと思い、扇風機で起こした風で、羽根の幅・角度・厚さ・形といった条件を変え、発電された電圧の変化を調べた。

また、今回は、一般的な水平軸のプロペラ型の羽根を使うことにした。

2 研究の方法

図のように装置を設置し、以下の項目を変化させ、発電された電圧を測定した。

扇風機の羽根から発電用の羽根までの距離は 25 cm とし、発電用の羽根を羽根軸の中心が扇風機の 1 枚の羽根の midpoint の一直線上になるように置いた。そして羽根に様々な変化を持たせて発電された電圧を計測した。



<変化させる項目>

扇風機の風速 3.4m/s 5.2m/s 6.5m/s
 羽根の幅 1 ~ 4 cm (長さは一律 10 cm)
 羽根の厚さ 0.3mm 0.5mm 1.0mm
 羽根の角度 15° 30° 45° 60° 75° 80° 85°

羽根の形

長方形	平行四辺形 前	平行四辺形 後	楕円形
半楕円形	三角形	逆三角形	台形

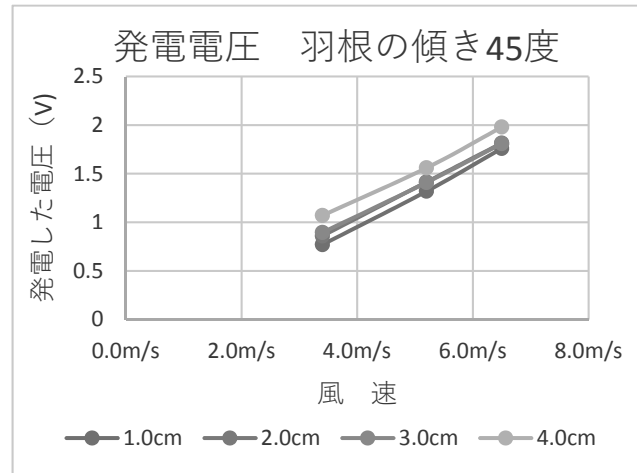
以上の条件より幅 2 cm ・ 厚さ 0.5mm ・ 長方形 ・ 45° の時の羽根を基準とし、調べたい条件を対照実験の方法で調べた。

3 研究の成果

(1) 羽根の幅 (1 ~ 4 cm)

羽根の幅による変化はほとんどない。

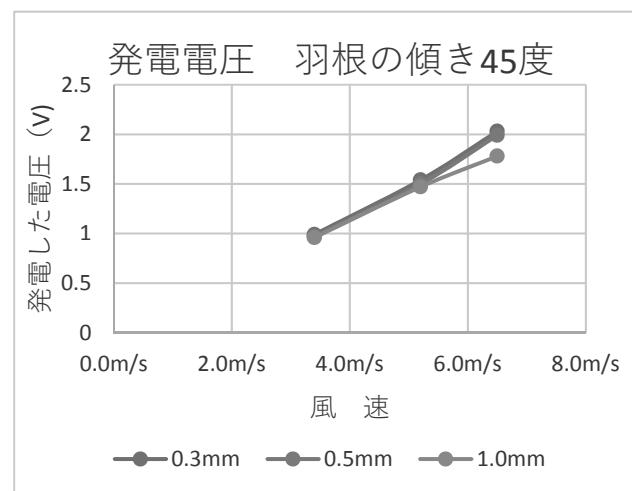
しかし、羽根の幅が大きくなるほど電圧が大きくなっているため、多少の影響は考えられる。



(2) 羽根の厚さ (0.3 mm ~ 1.0 mm)

羽根の厚さによる変化はほとんどない

したがって、羽根の厚さによる発電への影響はない。

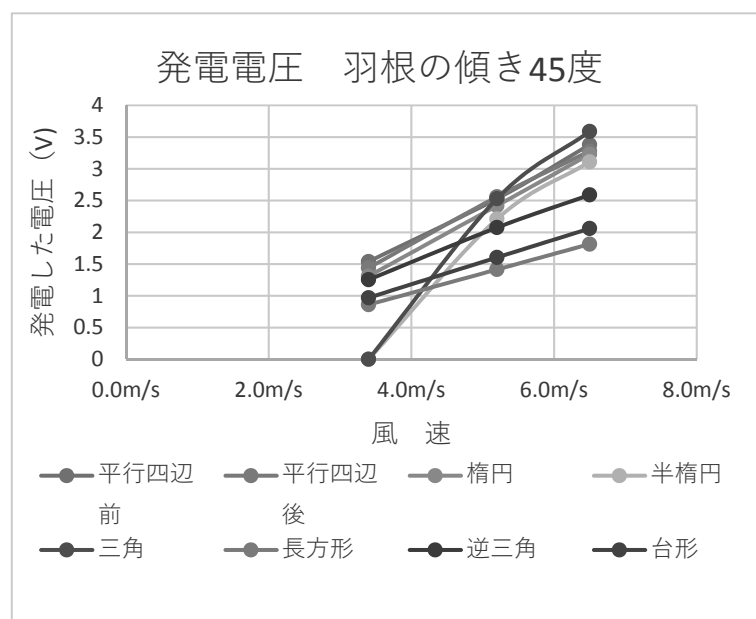


(3) 羽根の形

羽根の形は三角形、平行四辺形、楕円、半楕円、逆三角形、台形、長方形の順に電圧が大きい。この時、図形によって面積は違うが、(1)の結果より、面積による結果への影響は小さいと考えられる。

よって、これらの結果は、空気抵抗によるものと考えられる。

また、今回、三角形は一般的な風力発電に使われる羽根の形に近い形にしたが、これが最も発電効率が良かった。



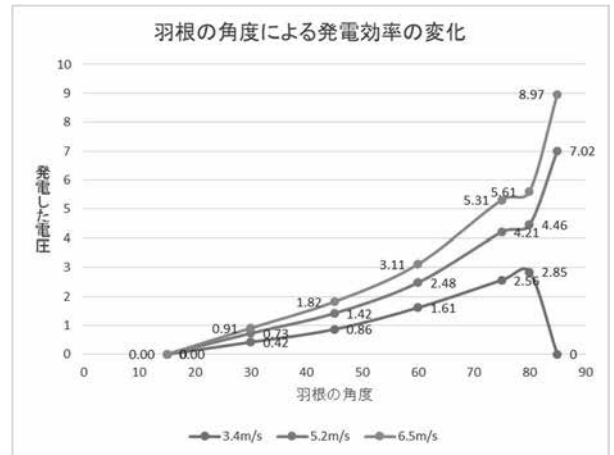
(4) 羽根の角度

ア 測定結果

羽根の角度を変えた場合、角度が大きくなるにつれて、電圧が大きく増加していくことが分かった。

このとき、風速 5.2m/s と 6.5m/s の時は、85° の時、風速 3.4m/s の時は 80° の時に電圧は最大となり、それよりも大きな角度では、角度 90° に近づくにしたがって電圧は減っていった。

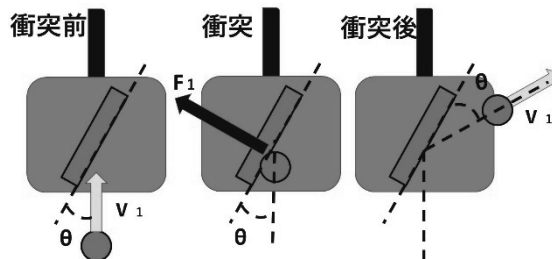
このことから、比較的弱い風の時は 80°、強い風の時は 85° で発電効率が良いことがわかる。



イ 結果から得られる数式

どうして上のグラフのような結果になったのか気になったので、今回の実験で何が起こったのかを考えながら発電された電圧を求める数式を求めることにした。

まず、風(空気分子の衝突)による羽根を回転させる力について考える。

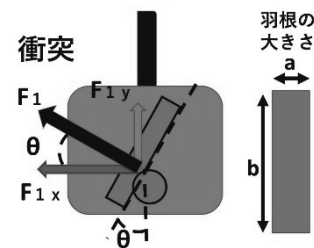


上の図において、空気分子 V_1 の羽根への入射角を θ 、衝突により生じる力を F_1 とする。このとき、力積=運動量の変化より(1秒間で平均して)

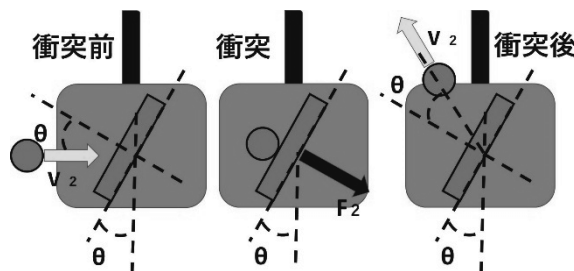
$$F_1 \times 1 = 2 \times (\rho \times a \sin \theta \times b \times v_1) \times v_1 \sin \theta$$

$$F_{1x} = F_1 \sin \theta \text{ より}$$

$$F_{1x} = 2\rho abv_1^2 (\sin \theta)^2 \cos \theta \text{ という式に表すことができる。}$$



次に、この時に生じる抵抗力を考える。



上の図より空気分子 V_2 によって生じる力を F_2 とする。

このとき軸付近と羽根の末端部では羽根の運動速度が異なるので、羽根の中心部に当たる空気の速さを考える。羽根の回転数を f とすると羽の中心に当たる空気の速さは $\pi b f$ となる。これを先ほどの様に整理すると $F_{2x} = 2\pi^2 \rho a b^3 f^2 (\cos \theta)^3$ という式に表される。

発電時に生じる抵抗を考えると、発電による抵抗力がする仕事率＝発電の電力として $F_3 = \frac{V^2}{\pi b f R}$ と表すことができる。

また、羽根にはたらく力のつり合いを考えると右の図のように $F_{1x} \times 3 = F_{2x} \times 3 + F_3$ と表される。

F_{1x} と F_{2x} にそれぞれの式を代入すると

$$6\rho a b v_1^2 (\sin \theta)^2 \cos \theta = 6\pi^2 \rho a b^3 f^2 (\cos \theta)^3 + \frac{V^2}{\pi b f R}$$

となる。

発電された電圧は回転数に比例する ($V = c \times f$) ものとし、 f を消去すると、

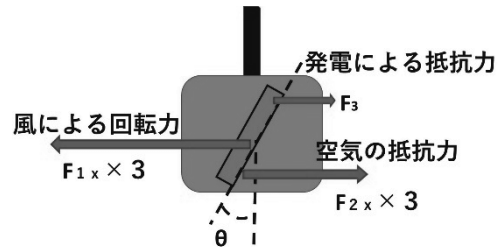
$$6\pi^2 \rho a b^3 (\cos \theta)^3 \times V^2 + \frac{c^3}{\pi b R} \times V - 6\rho a b c^2 v_1^2 (\sin \theta)^2 \cos \theta = 0$$

これは、 V の 2 次方程式になる。 $V > 0$ なので解の公式は、

$$V = \frac{-\frac{c^3}{\pi b R} + \sqrt{\left(\frac{c^3}{\pi b R}\right)^2 + 4 \times 6\pi^2 \rho a b^3 (\cos \theta)^3 \times 6\rho a b c^2 v_1^2 (\sin \theta)^2 \cos \theta}}{2 \times 6\pi^2 \rho a b^3 (\cos \theta)^3}$$

$K=c$ 、 $k = \frac{c^2}{\pi b R}$ 、 $A = 6\pi^2 \rho a b^3$ 、 $B = 6\rho a b$ 、 $v=v_1$ とすると

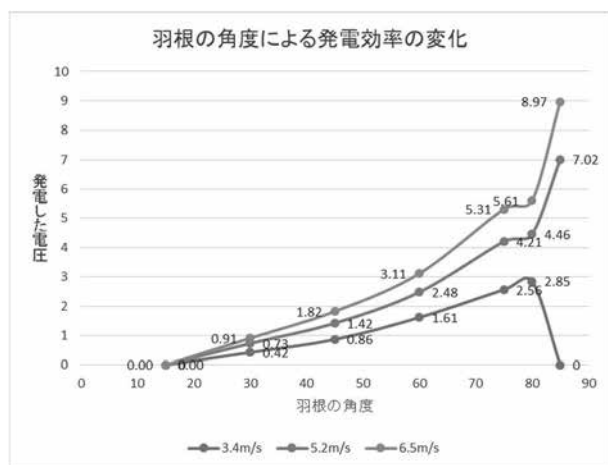
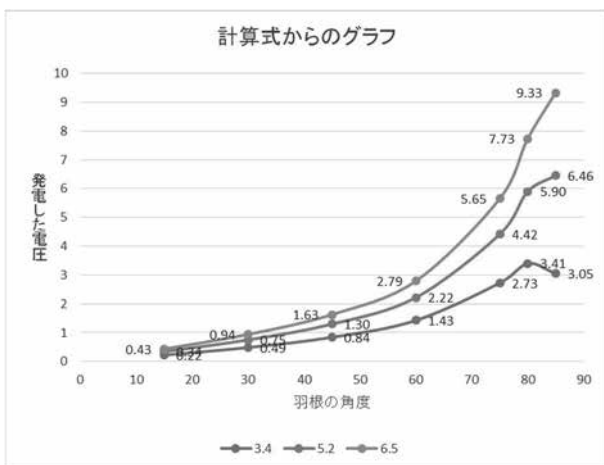
$$V = K \times \frac{-k + \sqrt{k^2 + 4ABv^2 (\sin \theta)^2 (\cos \theta)^4}}{2A (\cos \theta)^3}$$



ウ 数式から得られたグラフと実験結果の比較

上の数式から求められたグラフと実験結果をまとめたグラフは、非常によく似ている。したがって、この計算式を成り立たせるイの考え方は基本的に間違っていないと考えられる。

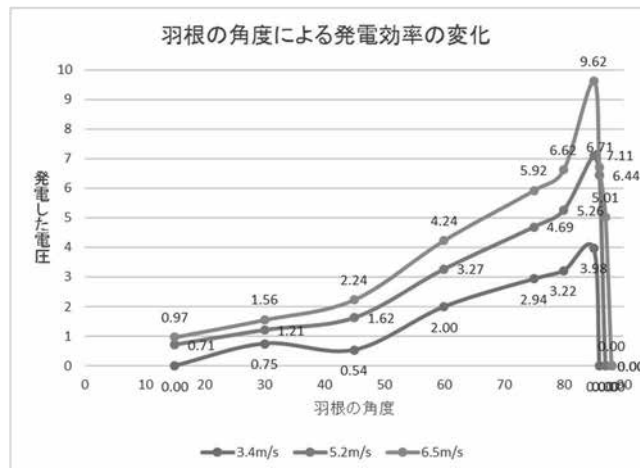
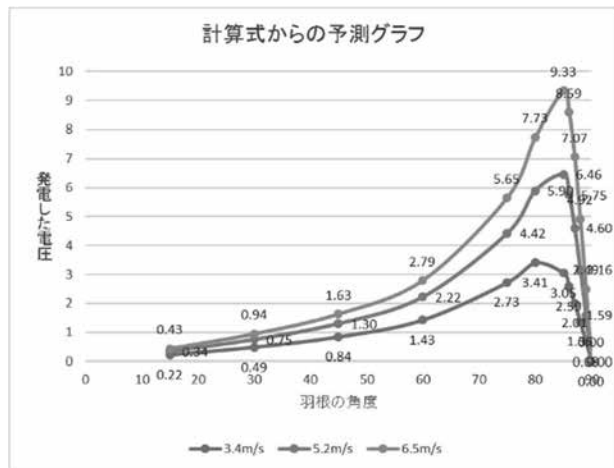
しかし、 80° の値は二つのグラフでは違った結果が出てしまっている。



エ 数式の検証

前の実験で得た数式を確認するため、これまで計ってきた角度に加え、 86° 87° 88° の角度も加え新たに調べた。

結果は下の通りで、上の計算式から求められるグラフに近い値が出たといえる。弱い風では羽根が回りにくいため予想通りに回らなかった箇所もあるが、全体としてみると計算式が正しいと言える結果だと考えられる。



4 考察

結果より、羽根の幅・厚さ・面積による発電効率の違いはほとんどなく、三角形・平行四辺形などは発電効率が良く、角度は 85° の時、発電量が大きくなることが分かった。

また、風力と発電された電圧は比例の関係にあることが分かる。

よって、今回の実験では、三角形の羽根の角度が 85° の時に最大の電圧が得られる。

5 反省・今後の課題

今回の実験では、羽根の幅2cm、厚さ0.5mm、角度 45° 長方形の羽根を基準に、条件を変えて実験しグラフの通りの結果を得たが、それ以外の条件の組み合わせでの実験することができなかった。

今後は、飛行機の羽根のように湾曲した羽根を用意し、より一般の発電用風車に近づけた実験を行い、ゆくゆくは、千本浜海岸で自然風を使って発電される電圧を確かめたい。

6 参考文献・ホームページ

- ・テクマガ No. 40 強力マグネットによる風力発電の高効率化

<https://www.tdk.co.jp/techmag/inductive/200907/index2.htm>