

(生物模倣) 昆虫の翅型風力発電機の開発

佐藤 圭一郎

I. はじめに

私は昨年、小型風力発電機を作成し、発電量を競う大会に挑戦した。専門書を読み、試行錯誤しながら作ったが、平均出力 1364mW (風速 2~7m/s) を記録することができた(大会 4 位)。そこで、「もう少し効率の良いブレードができるか?」と考え、発電量を計るために大型の風洞を作った。そして、この風洞で、「空気の流れの可視化」を行い、色々なブレードで試してみることにした。去年は、蝶の翅型 6 枚プロペラ風力発電で発電効率の良かった(低風速~高風速まで発電する)もので完成としたが、今年は生物模倣の要素をさらに付加し、トンボの翅をブレードづくりに生かしてみる。

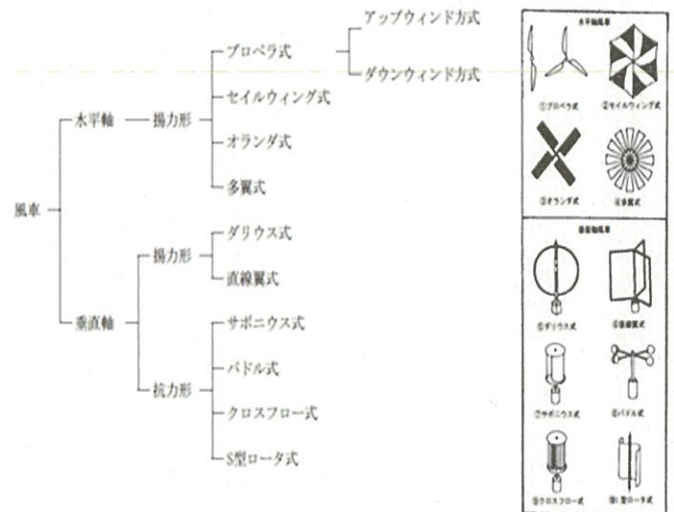
II. 目的

- ① 整流された 2~7m/s の風を作り出せる風洞を作る。
- ② その風で生物模倣のブレードの発電量を記録する。
- ③ ブレードまわりの空気の流れを可視化し、ブレードと空気の流れの関連性を調べる。
- ④ 最も発電効率の良いブレードで発電機をつくる。

III. 実験方法

大会 (WINCOM) 規定の自転車発電機 (ハブダイモ) を用い、2 種の水平軸の風車を作り、

自作の風洞で風速ごとの出力を計測する。本研究では、水平軸プロペラ式ブレード (昨年制作の蝶の翅型) と (トンボの羽根型) との風車とを比べる。



(新エネルギー産業技術総合開発機構「風力発電導入ガイドブック」)

規定①

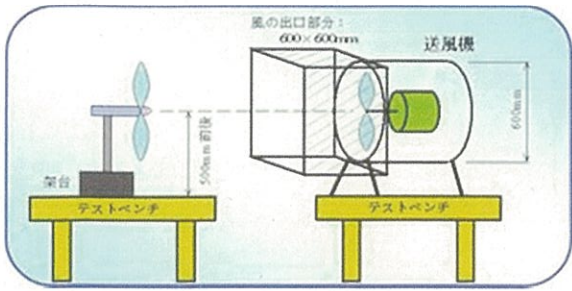
小型風力発電機の形状は、大会規定で高さ 80 cm、幅 80 cm、奥行き 80 cm 以内、総重量 20kg 以内。

規定②

ハブダイモ (JIS 規格品で時速 15 km の時に定格出力 2.4W または 3W) を使用し、15Ω のマンガニン線を用い、計測する。

規定③

風力発電機を風洞からの送風で運転させ、発電する発電量を計測する。風速を 2~7m/s で 1m/s 刻みで変化させ、各風速における発電出力を計測する。

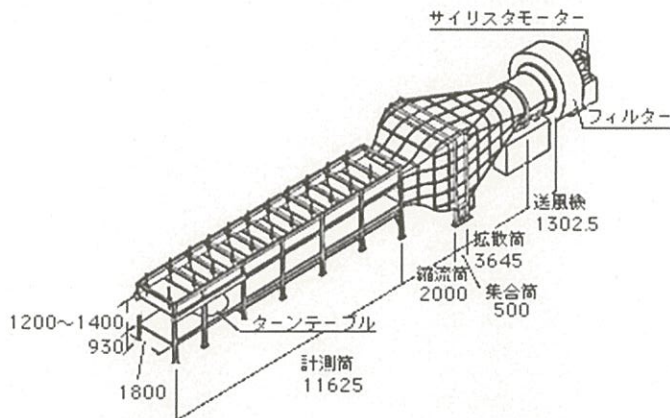


(日本大学生産工学部より)

IV 風洞とは

人工的に空気の流れを作るためのトンネル型装置のこと。

1年生の時に小型風洞を自作したが、整風するためのハニカムの作成に最も時間がかかり、苦勞したため、今回は専門業者から購入した。また、風力の出る送風機は業務用工場扇を使うことで最大風速 7m/s まで計測可能となった。縮流胴はプラダンを使用。全体で、縦 185 cm、横 85 cm、高さ 150 cm という大きさとなった。



(制作参考： 日本建築総合試験所 「風洞実験装置」)



(整流用ハニカム)

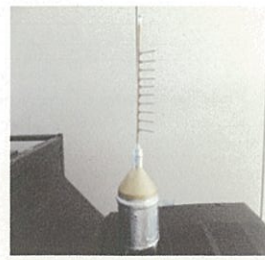


(煙発生器)

本研究では送風機→整流器→縮流胴→観測筒の順で空気を送り出す風洞を作成した。

観測部にパラフィンによる煙発生器とノズ

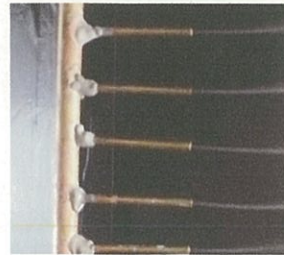
ルを取り付けた。



(ノズル全体像)



(ノズル部拡大)



(ノズル煙から噴出する煙)



(内部ハニカム)



(観測部と煙発生器を付けた全体像)

V 理論

① 風のエネルギー

風力パワー P [W] は、質量 m [kg], 風速 V [m/s], 空気密度 ρ [kg/m³], 受風面積 A [m²] とすると次の式になる。

$$P = 1/2 m V^2 = 1/2 (\rho A V) V^2 = 1/2 \rho A V^3$$

ベッツの法則では風から取り出せるパワー係数 C_p は最大で 16/27 (ベッツ係数) としている。風の持っているパワーの 0.593 までは理論的に取り出せる。 C_p の値が大きくなるほど風車の発電出力性能が高いと言える。上の計算式から風車の発電効率は受風面積と風速の 3 乗に比例することがわかる。

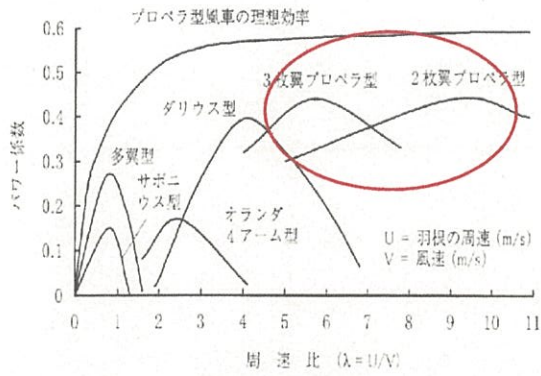


図2.3 各種風車の出力係数

(出典 さわやかエネルギー風車入門 牛山泉 平成8年)

② Re レイノルズ数

粘性流体の流れにおける粘性力と慣性力の比を表す。したがって、レイノルズ数が小さい流れにおいては、粘性による減衰効果が大きいため、流れは安定であり、逆に、レイノルズ数が大きい流れは一般的に不安定で乱流になる場合が多い。

$$Re = [\text{慣性力}] \div [\text{粘性力}]$$

$$Re = UL \div \nu$$

U 流れの速さ [m/s]

L 流れの中にある物体の代表的長さ [m]

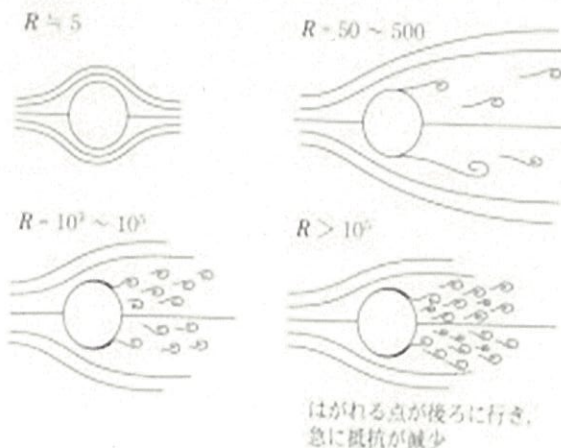
ν 動粘性率 = μ (粘性係数) \div ρ (密度)
(つまり動粘性係数 [m²/s] のこと)

μ 粘度または粘性係数 [Pa · s]

ρ 密度 [kg/m³]

臨界レイノルズ数 $Re = 2320$ で層流と乱流の境目。

$Re = 2000 \sim 4000$ が遷移領域であり、この間で層流が乱流へ遷移するといわれている。

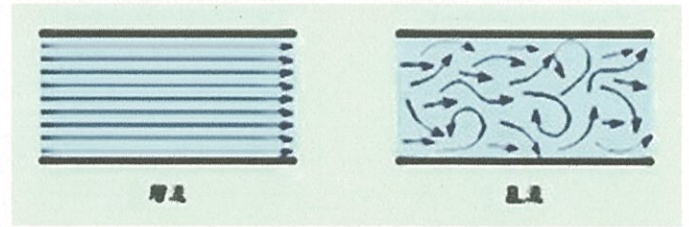


はがれる点が後ろに行き、急に抵抗が減少

(the 空気抵抗 参考)

③ 層流と乱流

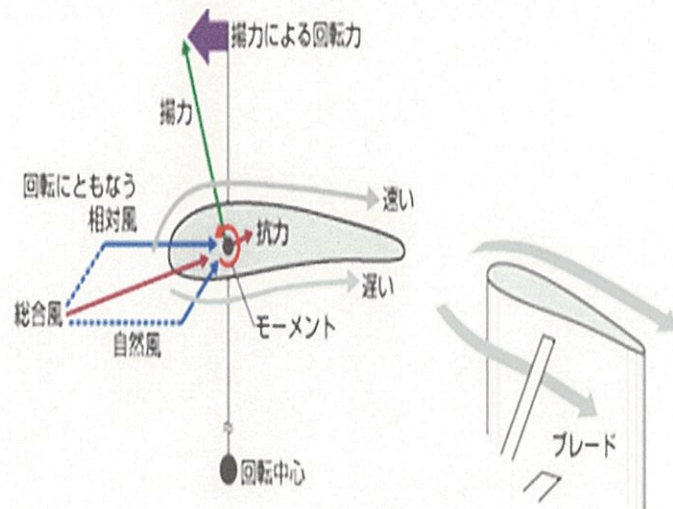
上の図のように流れの方向が一様な流れを層流といい、不規則な流れを乱流という。流れが層流から乱流に変化することを遷移という。



(私編 雑科学ノート 参考)

④ 風車が回る原理

風車の動作については抗力型と揚力型があり、それぞれ風エネルギーを回転力に変える方法が異なる。本研究では揚力型風車を作成する。(ちなみに抗力型の代表はサボニウス型風車)

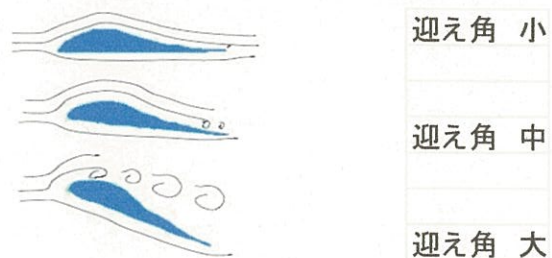


(株式会社 シグナス 参考)

翼上部の速い風の方に翼は押されるため回転が生まれる。

⑤ 剥離

物体表面に沿う流れが下流側で表面から離れる現象。



(グライダー用語集より 参考)

⑥ トンボの翅

そよ風でよく回るようにするにはレイノルズ数の低いところで効力発揮されるブレードが必要と考えた。トンボの翅の特徴は凸凹の中に空気の気流が出来て、翅部分と周辺の空気を過流がぐるぐると移動しながら周辺の空気を移動させ、空気の停滞域を発生させない。

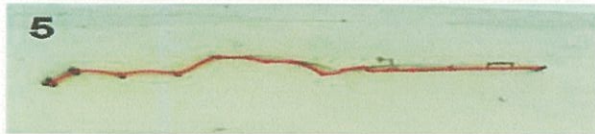


写真2上 ギンヤンマ前翅 75% 断面
(Okamoto, Yasuda & Azuma, 1996)

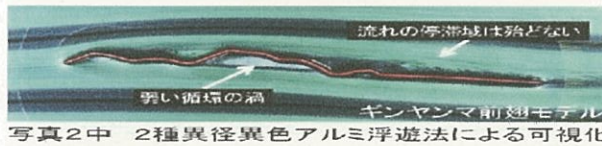


写真2中 2種異径異色アルミ浮遊法による可視化

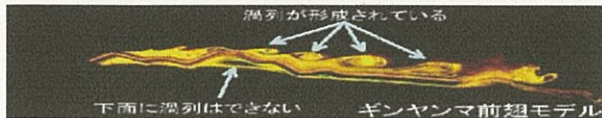


写真2下 定常可視化実験結果

(日本文理大学 マイクロエコ風車より)

本実験では、日本文理大学のマイクロエコ風車の理論を参考にしてさらにディンプルを付けた独自の6枚羽根(ブレード)を作成した。

⑦ ディンプル (乱流と剥離の関係)

例えばゴルフボールにはディンプルが付いている。それは、つるつるのボールに比べてボールの表面の境界層の状態が層流だがディンプルボールは乱流になっている。そして、乱流の方が層流よりも気流の剥離が遅れるため、剥離の始まる地点が後退する。その結果、乱れ領域の小さい乱流境界層の方は空気抵抗が少なくなり、飛距離が伸びる。

よって、ディンプルを付けることによって空気抵抗が減少し回転数が増え、電力が増加することを期待した。

VI 実験

(事前準備) ハブダイモの分解



風力発電機の実験にあたって、まず、自転車のハブダイモを用意した。(シャ) DH-2N30-J)

実際に回転させてみると、とても固く感じたので、分解して、中身の状況をチェックしてみた。すると、ベアリング部分を中心に粘度のある油がべっとり付いていたので、全てふき取り、シン油に変えた。また、数千回、回転させて滑らかに回転するようにした。

(1) ブレードの作成

PP板を用意し、幅 10 cm×長さ 35 cmのブレードをそれぞれ6枚ずつ作成した。

(2) ダイナモとブレードの固定

ブレードのピッチ角が 30~40° で固定するために、金属スペーサーとボルトを使用。金属スペーサーの高さで角度を調整。

(3) マウント (土台) の作成

軽量で、空気抵抗の少ない頑丈なものが必要と考え、家具用の鉄パイプをH型に組んで固定した。



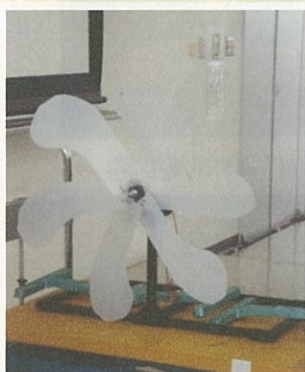
(4) ブレードの作成

それぞれのブレードでテストした結果、PP板 2.5 mm、幅 10 cm×長さ 35 cm、質量 25g、6

枚が本実験での最適ブレードと判断した。その後、ブレードの曲線を蝶の翅を参考に平板羽根型を、また、トンボの翅を参考にトンボの羽根型ブレードを制作した。

PP板はお湯に浸けると簡単に曲がるため、あらかじめ木材で型を作り、その型にPP板を押し当てて成形した。柔らかいブレードのため、暴風時にはしなり、風を受け流す仕組みになっている。(双方とも風速8m/s以上の風速になるとしなり始める。)

○昨年制作の平板羽根型水平軸風車

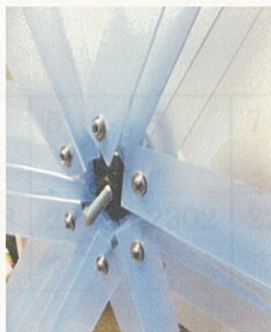
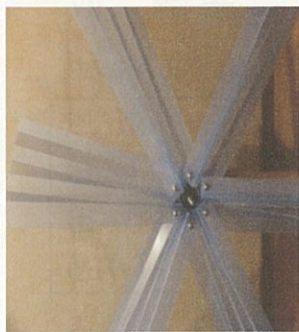


風車全景



接合部

○本年制作のトンボの羽根型水平軸風車



実際に装着するブレードは、下の写真の風洞で実験する。



その前に、事前に、簡易風洞で翼の周りの空気の流れを確認する。ここでは、あくまでも、予備的に見る為なので、レイノルズの相似則は無視する。



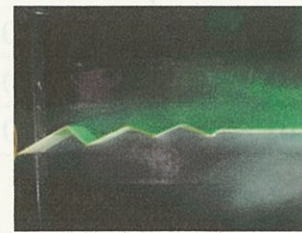
レーザーポインタを振動させその光を煙に当てる装置と線香の煙を下から集め、上部のファンから吸い上げることによって、層流を作り出す装置。



(翼周りの空気の流れを可視化する実験 : 翼型ブレード)

(5) レイノルズ数の変化

自作の風洞でレイノルズ数の変化がどのように起きるか実験した。



これは $U=2\text{m/s}$, $Re=76$ のときの写真。レイノルズ数からいえばぎりぎり層流。



(大きな迎え角で失速状態)



(翼のギザギザにカルマン渦が現れた。)

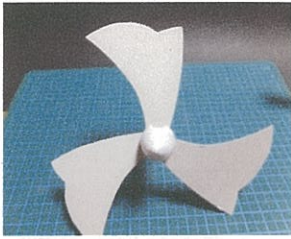
風速を上げて $U=4\text{m/s}$, $Re=152$ の写真。

カルマン渦がブレード後方にうっすら見える。

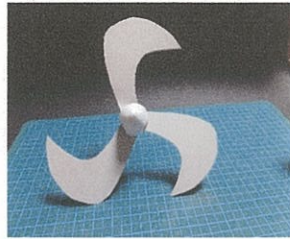
さらに風速を上げ $U=7\text{m/s}$, $Re=266$ になった。この程度だとまだ、完全な乱流にならない。参考書によると、レイノルズ数が 2000 ほどになると、乱流へと変化するらしい。

(6) 各ブレードで風速 2~7m/s の風に当てて出力電力を計測する。

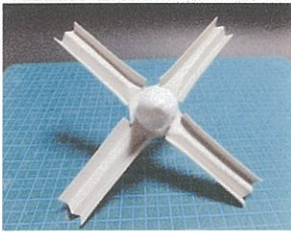
参考までに、色々な翼 (ブレード) も試してみた。(これは、次回の研究報告にて発表)



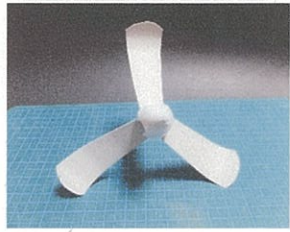
(蝶 3枚羽根型)



(カモメ 3枚羽根型)



(トンボ 4枚羽根型)



(カエデの種の羽根型)

VII. 結果

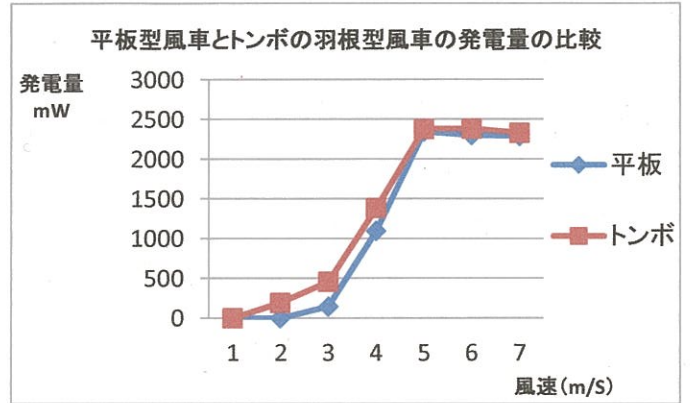
平板 6枚羽根ブレード

風速 (m/s)	2	3	4	5	6	7
出力 (mW)	0	146	1098	2346	2302	2292

トンボの羽根型ブレード

風速 (m/s)	2	3	4	5	6	7
出力 (mW)	195	458	1385	2380	2385	2331

二つのデータを重ねると、次のようになる。



発電効率について考えてみると、前述の理論

①より、発電効率 $[C_p]$ を求める式は、

$$C_p = 2W / PAV^3$$

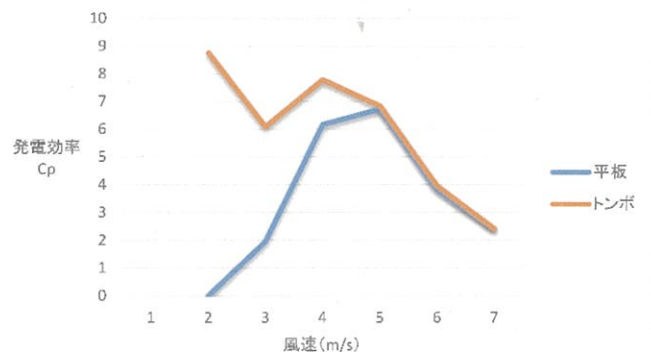
となる。この式に $P=1.165$ (理科年表より、気温 30°C の空気密度) $A=0.478$ $V=2\sim 7$ を代入すると下のようになる。

風速 (m/s)	平板型	トンボの羽根型
	発電効率 C_p	発電効率 C_p
2	0	8.76×10^{-2}
3	1.95×10^{-2}	6.09×10^{-2}
4	6.17×10^{-2}	7.78×10^{-2}
5	6.73×10^{-2}	6.83×10^{-2}
6	3.83×10^{-2}	3.96×10^{-2}
7	2.40×10^{-2}	2.41×10^{-2}



(WINCOM大会当日映像から)

平板型とトンボの羽根型の発電効率の比較



V. 考察

① (平板6枚羽根ブレード)

少しでも出力できるように風受け面積を工夫(先端部を大きく)したが低風速(2m/s)の時、出力は0だった。

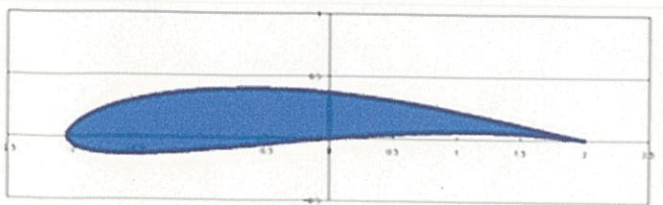
最高出力は風速 5m/s 時であり、徐々に下がるが、これは、風速が増すにつれてブレードのブレが増えたためである。1枚のPP板をボルトで固定するだけでは風速 7m/s の風に耐え難い。

② (トンボの羽根型ブレード)

低風速~高風速のすべての出力において平板6枚羽根ブレードを上回っている。これは、レイノルズ数の変化の写真で示したように、トンボの羽根型ブレードのギザギザ面に当たった風が翼表面に小さな渦を作り、ブレード全体の空気の流れがNACA型のような流れをするからだと思われる。また、それによって、ブレード上面の気圧が下がりやすく、微風でも回転しやすくなると考えられる。

そして、平板6枚羽根ブレードに比べ、ギザギザに折り曲げたことにより剛性が増し、ブレードのブレが少なくなった。

発電効率の面からは、平板に比べ、より低風速での効率が良いことが分かる。これは、風を捉えて翼型の気流を生み出すトンボの羽根が、微風の状態で発電効果を発揮することを表していると考えられる。



(NACA型翼 wikipedia より)

VIII. まとめ

低レイノルズ数域での翼は、前縁が丸みのあるNACA翼(現在のアメリカ航空宇宙局が公表している翼型)よりも、前縁をギザギザにし

た翼型や前縁をとがらせて流れを一旦剥離させた翼型の方が高い電力出力を得られると流体力学の本に書いてあった。確かに、昆虫の翅は流線型ではなく、前縁がギザギザで、凸凹、薄く尖っている部分がある。これを参考にしたトンボの羽根ブレードは2~7m/s程度の風速下で効果的な結果を得られた。8m/s以上の風速で実験したところ、ブレードがたわみはじめ、計測続行が困難になってしまった。

流体内に物体に働く力には慣性力(=物体の密度×速度×面積)と粘性力(=物体の表面積×速度の勾配)があるが、物体が小さくなり、速度が遅くなると、レイノルズ数を示す式の分子が減少して、慣性力の効果が減り、粘性力の効果が増すと考えられる。粘性力に注目するならば、ディンプルの付いたゴルフボールのように、乱流を起こし、剥離点を後退させられるかが重要だと思われる。よって、トンボの羽根型ブレードは平板よりも乱流が起きやすいので、より早く回り、出力電力が高いと思われる。

IX. 今後の展望

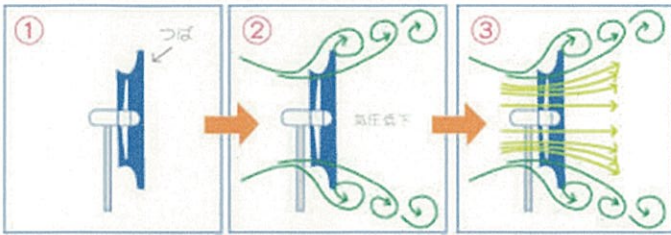
本実験により、昨年制作の平板6枚羽根ブレードより優れたトンボの羽根型ブレードができたので、これにプラスして風レンズと集風装置を付けた風力発電機を制作した。この風車で大会上位入賞を目指したい。

また、その装置で発電した電力は、2000mWもあるので、全波整流回路で交流から直流に整流し、携帯電話や、USB機器に充電できるように利用方法を考えていきたい。

※(風レンズ) 風の入りに筒(ディフューザ)を取り付けることにより、風レンズ後方に渦を発生させ、気圧を低下させる装置。これにより、風車入り口の風速が増し、風速が増加する。発電量は風速の3乗に比例するので、発電効率の上昇が期待できる。

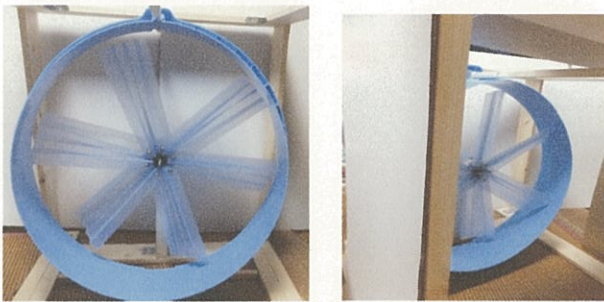


(九州大学 風レンズ風車より)

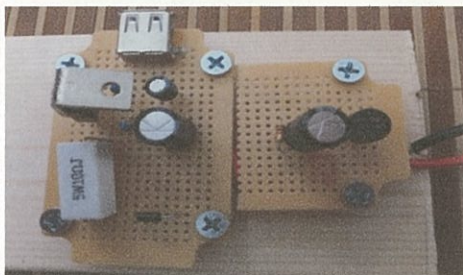


(有限会社 共立機工より)

- 中村昌広 著 SB新書 2013年
- ・ 風車工学入門
- 牛山泉 著 森北出版 2013年
- ・ 小型風車活用ガイド
- 松本文雄 著 パワー社 2004年
- ・ 手作り風車ガイド (改訂版)
- 松本文雄・牛山泉著 パワー社 2006年



(自作風レンズと集風板をつけたトンボの羽根型風車)



(バダイトからの交流電力を直流電力に整流し、
USB機器に接続できる回路)

参考文献

- ・ 流れの科学
アッシャー・H・シャピロ著
今井 功訳 河出書房新社 1981年
- ・ 超小型風車の製作
三野正洋 著 パワー社 2011年
- ・ 流体力学
武居昌宏 著 オーム社 2009年
- ・ 自分で作るバダイト風力発電+
- 川村康文 著 総合科学出版 2012年
- ・ 自宅で楽しむ発電