

課 題 情 報 シ ー ト

テ ー マ 名 :	マグナス風車の試作と検証		
担当指導員名 :	茂木 望	実施年度 :	27 年度
施 設 名 :	北海道職業能力開発大学校		
課 程 名 :	専門課程	訓練科名 :	電気エネルギー制御科
課題の区分 :	総合制作実習課題	学生数 :	1
		時間 :	12 単位 216 (h)

課 題 制 作 ・ 開 発 の ポ イ ン ト

【開発（制作）のポイント】

風力発電機には、プロペラ型をはじめ様々な形のものがありますが、本製作では、自然エネルギーを活用する際の PR 効果を高めるために、通常あまり見ることのない形のもので、風力発電に興味を引きやすいものを製作したいと考え、マグナス効果を利用した小型の風力発電機を製作することとしました。その際、この風車ではブレード自身を回転させる必要があります、実用化されている風車では、その回転に電動機を使用していますが、本製作では、発電のために電気を使わずに済むようにブレード自身を回転させる風車を追加するという工夫にしました。

【訓練（指導）のポイント】

風車の製作では機械設計が必要になるため、図面の見方・描き方と CAD に関する知識が必要になります。また、必要な部材を手加工によって行う場合、事前に機械工作の知識や技術習得が必要となります。

本製作では、マグナス効果を生じさせるために必要な円柱の回転をどのような仕組みで行うのか、考えることから始まり、実際にそれでマグナス風車の回転力を得ることができるようかを予備実験を行い、思考錯誤を繰り返しながら製作を進めることとなりましたが、風車が動作したときには、学生にものづくりの楽しさや粘り強さの大切さを実感させることができました。

課 題 に 関 す る 問 い 合 わ せ 先

施 設 名 : 北海道職業能力開発大学校
 住 所 : 〒047-0292 北海道小樽市銭函 3 丁目 1 9 0 番地
 電話番号 : 0134-62-3553 (代表)
 施設 Web アドレス : <http://www3.jeed.or.jp/hokkaido/college/>

課題制作・開発の「予稿」および「テーマ設定シート」

次のページ以降に、本課題の「予稿」および「テーマ設定シート」を掲載しています。

マグナス風車の試作と検証

1. はじめに

地球温暖化対策として国際会議が初めて開かれたのは1995年、十分な結果が出ないまま20年が経ちツバルの海面上昇による土地の浸水、インドの熱波による路面の溶解、アメリカ・オーストラリアの干ばつによる森林火災など深刻な影響が世界中で目立ち始めている。

今やエネルギーは生活に欠かせないものとなっている以上、安心して安全な自然エネルギーの普及は勿論、より省エネで効率の良いエネルギー開発も同時に進めていかななくてはならない。

自然エネルギーの中でも風力を使った動力(揚水や製粉等)の歴史は古く、特別な材料や大掛かりな設備も必要とせず、また、不測の事態が発生した場合にも被害も最小限に抑えられる風力発電は発電としてもまだ改良の余地があると考えた。

試作した風車は既存のマグナス風車の回転円柱に使われているモータの代わりに垂直軸風車を使用することとした。そのことによって余分な電力を消費することなく省エネが図られる。垂直軸風車を使うことによってどのような影響があるか、回転数や揚抗比などを検証した。

2. 原理と構造

マグナス風車は、図1のようにブレードとなる回転円柱の左方から風を当てると円柱上部は流速が早く圧力が小さくなり、円柱下部は流速が遅く、圧力が大きくなることによって圧力差が生じ、揚力を得るマグナス効果を利用しており、低速回転で発電する為、静粛性に富み、騒音やバードストライクの危険性も避けられる特徴がある。

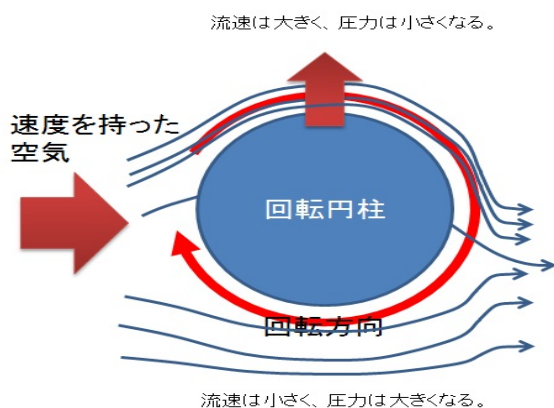


図1 マグナス効果

円柱ブレードには、円柱自体を回転させる為の垂直軸風車(クロスフロー型)とその回転力が充分得られるように回転力の邪魔している半分の面に風を遮る為の遮蔽板を取り付け、風が受け止められやすくするように、フィン(ロープ)を巻き付け、翼端にはエンドプレートを取り付けた。

3. 試作の概要

3.1 設計

水平軸プロペラ風車を参考に3枚ブレードマグナス風車をCADで設計した。(図2)

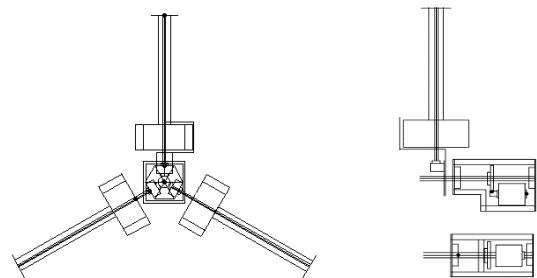


図2 マグナス試作機 図面

3.2 回転用垂直軸風車

マグナス効果を生じさせるために必要な垂直軸風車は、100×70mmの塩化ビニル樹脂製の羽根を5枚用いたクロスフロー型とし、大・小2種類(側板の五角形の外接円: $\phi 216$ 、 $\phi 158$)のサイズで試作したが、小サイズでは円柱ブレードを回転させられなかったため、大サイズを用いた。(図3)

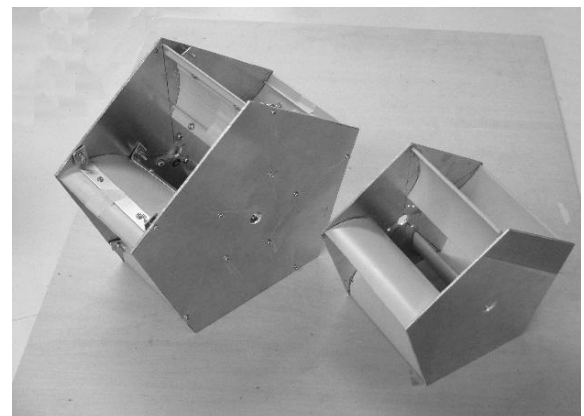


図3 回転用垂直軸風車

なお、垂直軸風車の羽根の質量は1枚当たり23gであり、羽根のカーブは、 $r=81\text{mm}$ である。

3.3 円柱ブレード

円柱ブレードは比較のため2種類（ $\phi 48$ と $\phi 76$ ）の塩ビ管を使用し、長さは420mmとした。円柱ブレードの回転軸には10mmのアルミ棒を使用し、翼端には $\phi 100 \times 2\text{mm}$ 厚のアルミ製エンドプレートを取り付けた。

なお、実験の際、風速を上げたところ振動により遮蔽板と垂直軸回転風車が接触した為、遮蔽板をワイヤーで中心に引っ張り振動を抑えることにした。

3.4 ハブ・ナセル

ハブは3本のブレードとそれを支えるベアリング・遮蔽板を固定する場所のため、強度を重視し4.5mm厚の鋼板を使用した。

ナセルは、20mm角のアルミフレームを用いて製作し、発電機及び増速歯車などを収納し、発電機はサドルにより固定した。増速歯車の歯数は21:100（4.76倍）とした。天井面・側面にはアクリル板、床面には合板を使用した。（図4）

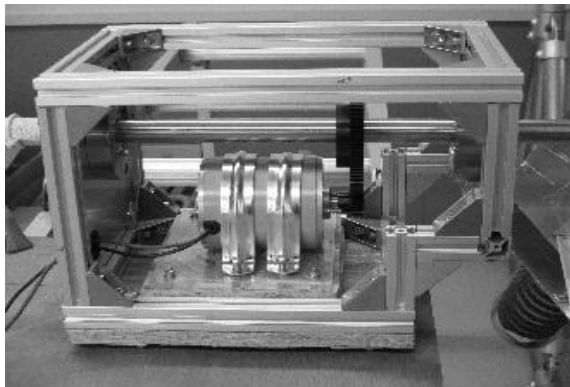


図4 ナセル

3.5 発電機

発電機は、授業で製作したコイル巻数が156、定格電圧12V、定格出力70WのDCブラシモータを直流発電機として利用した。

3.6 仕様

製作した風車の仕様を表2に示す。

表2 マグナス風車試作機 仕様

	寸法[mm]		重量[kg]
ブレード	半径650	$\phi 48 \times 420$	5.43
		$\phi 76 \times 420$	6.30
ナセル	305 $\times$ 200 $\times$ 210 (発電機・シャフト含む)		8.30
発電機	巻数 156 出力 0.12W(100回転時)		

4. 実験方法の概要

4.1 予備実験

4.1.1 直流発電機の特性

DCモータを発電機として使用したときの特性を次の方法により測定した。

同一のDCモータを2台用意し、そのシャフト同士をカップリングでつなぎ、1台は電流を流して回転させる。別の1台は発電機として使用するため電子負荷装置を接続し、電圧・電流を測定して出力を求める。なお、回転数の測定にはハンディタイプのデジタル速度計を用いた。

4.1.2 回転用垂直軸風車の特性

垂直軸風車がどの位の風速で回転し、マグナス風車の回転にどの程度影響を与えるかを検証するため、風速と垂直軸風車の回転数の変化について測定を行った。実験では事前に垂直軸風車の回転むらを抑えるため、5枚の羽根に1～5gのウェイトを取り付け、バランス調整を行った。（図5）

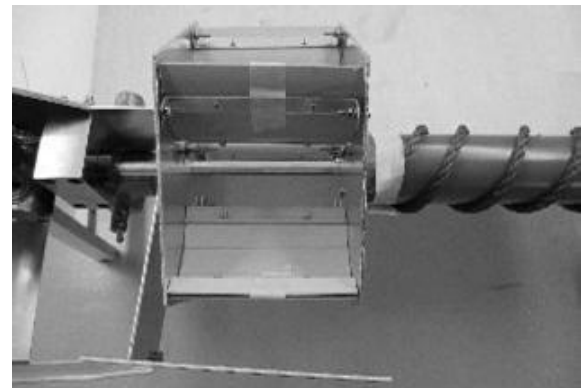


図5 垂直軸風車のバランス取り

4.2 本実験

4.2.1 マグナス風車の出力特性

風車部と発電機部を組み合わせたマグナス風車の特性を以下の要領で測定した。

- (1) 円柱ブレードのフィンの有無によるマグナス効果の発生具合を比較する。
- (2) フィン付き円柱ブレードにおいて、円柱径の違いがマグナス効果に与える影響を比較する（円柱の径は、 $\phi 76$ と $\phi 48$ とする）。
- (3) 発電機の負荷として電子負荷装置を接続し、風速と発電機出力の関係を記録する（円柱の径は、 $\phi 76$ と $\phi 48$ とする）。

なお、垂直軸風車部と同様に円柱ブレードのバランスを取るため、実験前に各円柱ブレードの先端に適切なウェイトを取り付けた。

4.2.2 マグナス風車の始動トルク測定

マグナス風車の始動トルクを調べるため、重りをぶら下げる方法により、以下の手順で始動トルクを測定した。

- ① マグナス風車のシャフトに摩擦ブレーキ用の紙やすりを巻きつけ、紐を数回巻き付けた先に分銅をぶら下げる。(図6)
- ② 風速を上げて風車が動き始めた(シャフト上部の紐がたるんだ)ときの風速を記録する。

トルク T は以下の式で求める。

$$T = \frac{W \cdot L}{10.2} \text{ [mN]}$$

W : 重りの質量[g] L : シャフトの半径[cm]

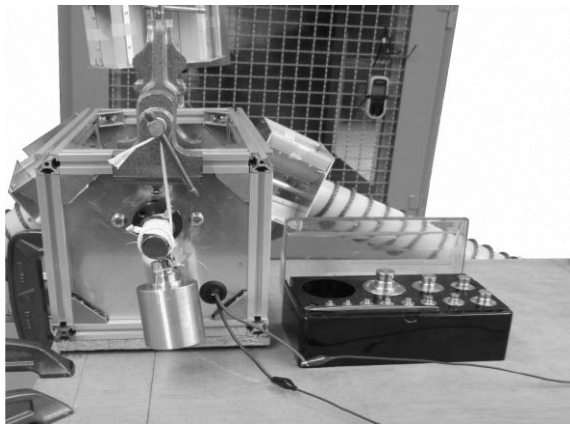


図6 始動トルク測定

なお、本実験ではマグナスブレードの直径135cm に対して、風力源として使用した風力実験装置の吹出し口が60×60cm と小さく、同時に3本のブレードに風を当てることが出来なかったため、1本の円柱ブレードを水平にした状態を初期状態として実験を行った。(図7)

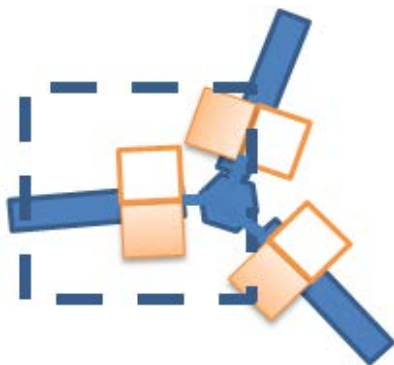


図7 風力実験装置と風車の受風面

5. 実験結果及び考察

5.1 予備実験

5.1.1 直流発電機の特性

直流発電機の出力は、70[min^{-1}]で回転させたときに43[mW]、100[min^{-1}]の回転時は128[mW]と極めて小さいものであった。(図8)

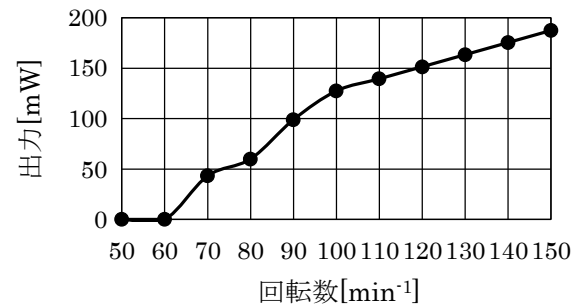


図8 発電機の回転数－出力特性

5.1.2 垂直軸風車の特性

垂直軸風車は、風速2.7[m/s]から回転し始め、6[m/s]までは風速に比例して回転数が上昇しているが、それ以降の回転数は飽和状態に近付いている。(図9)

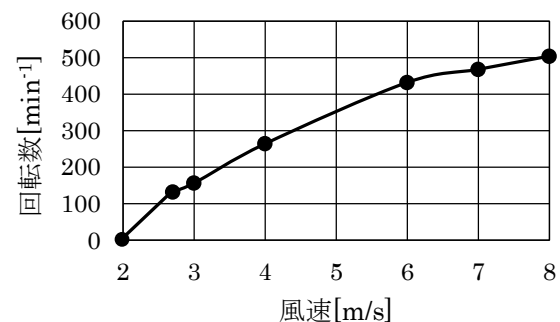


図9 垂直軸風車の風速－回転数特性

垂直軸風車は主に抗力を回転動力としているため風速以上の回転速度が出ないとされており、弱い風力でも回転するが、回転数に限界がある。

なお、翼端速度は、

$$V_b = \frac{2\pi r N}{60} \text{ [m/s]}$$

r : 翼半径[m] N : 回転数[min^{-1}]

であるから、風速8[m/s] (回転数504[min^{-1}]) における翼端速度は、

$$V_b = \frac{2\pi \times 0.1 \times 504}{60} \approx 5.28 \text{ [m/s]}$$

となる。

5.2 本実験

5.2.1 マグナス風車の出力特性

(1) 円柱ブレードのフィンの有無によるマグナス効果の比較実験

φ76ブレードにフィンを取り付けずに実験をしたところ、風速6[m/s]程度で若干動く気配が見られたものの、回転するには至らなかった。

(2) フィン付き円柱ブレードの円柱径の違いによるマグナス効果の比較実験

無負荷状態では、円柱径がφ76とφ48の場合では、それぞれ風速5.3[m/s]、6.1[m/s]で回転し始めた。初動については、ブレード幅（円柱の径）が広い方が有利に見えたが、その後、風速に比例して回転数は増加し、幅による差は見られなかった。（図10）

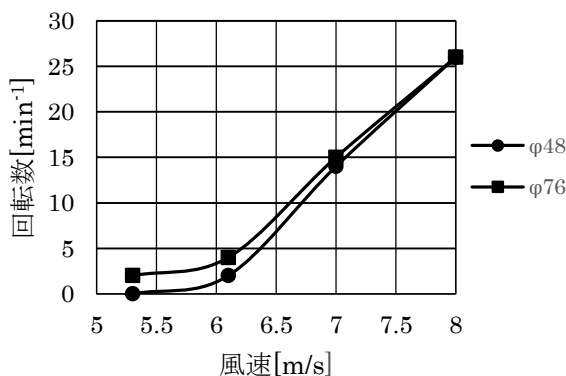


図10 マグナス風車の風速一回転数特性（無負荷）

(3) 負荷接続時の発電機出力の比較実験

負荷接続時はブレードの幅が異なっているにもかかわらず、風車が回転し始める風速にあまり変化はないが、風速を上げるに従って出力に差が生じた。（図11）

これは、ブレードの幅が広がると受風面積に対するブレード投影面積（ソリディティ比）が大きくなるため、抗力の影響により回転数が上がらなかったためと考えられる。

一般の水平軸風車が風から得られるエネルギーは風車の受風面積に比例し、風速の3乗に比例することからブレードの半径が長いほど、或いはソリディティ比が小さいほど発電能力が高い。こういった理由からブレードを長くし、ハブに近い羽根の形状は太く先端に行くほど細くするといった工夫がなされている。

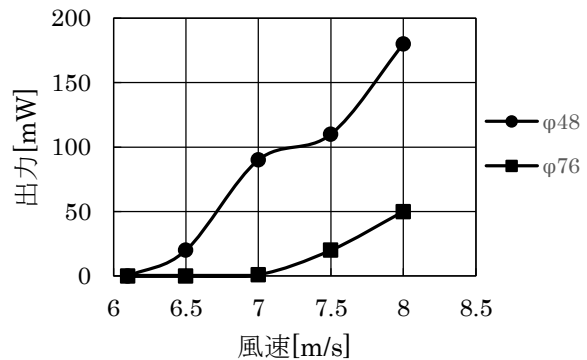


図11 マグナス風車の風速－出力特性

5.2.2 マグナス風車の始動トルク

始動トルクはブレード幅の広い方が大きい結果となった。（図12）

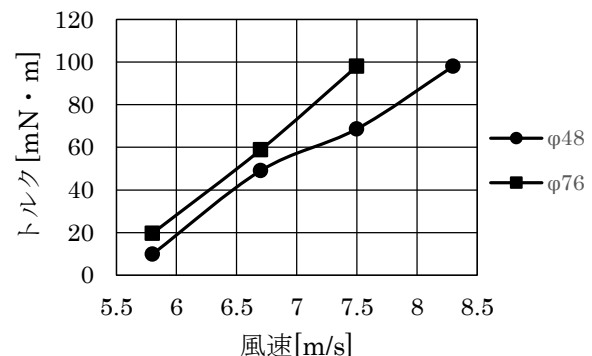


図12 マグナス風車の始動トルク特性

5.3 揚力・抗力、揚抗比の検証

以上の実験結果から求めた揚力・抗力及び揚抗比を図13、図14に示す。

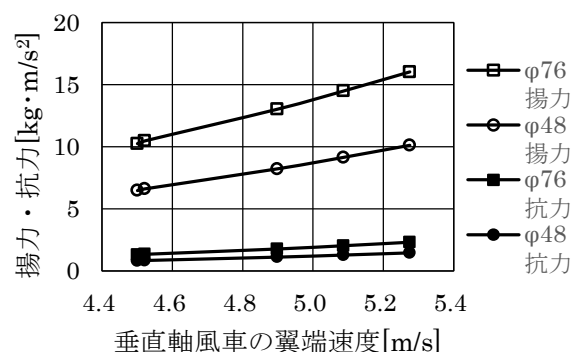


図13 垂直軸風車の揚力と抗力

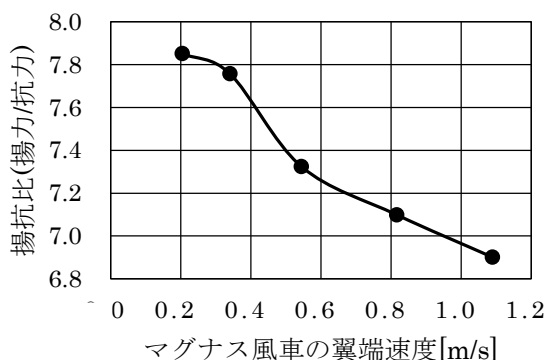


図14 マグナス風車の揚抗比

表3 風速と翼端速度対応表

風速[m/s]	6	6.1	7	7.5	8
垂直軸風車 [m/s]	4.5	4.52	4.9	5.09	5.28
マグナスφ48[m/s]	0.14	0.54	1.22	1.36	2.04
マグナスφ76[m/s]	0.2	0.34	0.54	0.82	1.09

図13から垂直軸風車の回転速度は抗力で微増程度。揚力では比例して大きくなった。

図12の始動トルク特性、図13の揚力をみるとφ76の方が大きく、回転させる力も大きい。

図14の揚抗比において回転速度が上がる程、低くなったのは揚力が風速に比例して大きくなったのに対し、抗力は風速の二乗に比例して大きくなることからくる。

通常、高速回転で発電することを目的としている小型プロペラ風車の揚抗比は8前後が最適となっており、それに比べると若干小さくなっている程度で遜色がない。

揚力 FL 、抗力 FD および揚抗比 L/D は次式で求めた。

$$FL = \rho l U \Gamma \text{ [kg} \cdot \text{m/s}^2 \text{]}$$

$$\text{循環 } \Gamma = 2\pi a q \text{ [m}^2/\text{s]}$$

ρ : 空気密度 1.225 [kg/m³]

l : ブレード中心からの長さ [m]

U : 風速 [m/s]

a : 円柱ブレード半径 [m]

q : 垂直軸回転速度 [m/s]

$$q = \frac{2\pi a n}{60} = \frac{\pi a n}{30} \text{ [m/s]}$$

n : 回転数 [min⁻¹]

$$FD = \frac{\rho U^2 C_d A}{2} \text{ [kg} \cdot \text{m/s}^2 \text{]}$$

C_d : 抗力係数

A : 投影面積 [m²]

$$L/D = \frac{FL}{FD}$$

抗力係数は、レイノズル数 R_e から求まる。

$$R_e = \frac{Ud}{\nu}$$

U : 風速 [m/s]

d : 円柱直径 [m]

$$q = \frac{2\pi a n}{60} = \frac{\pi a n}{30} \text{ [m/s]}$$

ν : 動粘生係数 [m²/s] (空気は 1.5×10^{-5})

上式より、風速6~8[m/s]におけるレイノズル数は、φ48の円柱ブレードでは $1.9 \times 10^4 \sim 2.5 \times 10^4$ 、φ76の円柱ブレードでは $3.0 \times 10^4 \sim 4.0 \times 10^4$ となる。この値をもとにレイノズル数と抗力係数の関係グラフ (『流れの科学』p87) を用いて抗力係数を求めたところ、φ48、φ76の円柱ブレードのどちらも1.2となった。

試作したマグナス風車と同規模の小型プロペラ風車の抗力係数は0~0.3であるから、試作風車には大きな抗力が掛かっていることがわかる。

5.4 マグナス風車に掛かる遠心力の検証

マグナス風車 ($r = 0.65\text{m}$) の回転数は風速8[m/s]において26[min^{-1}]程度であり、同規模のプロペラ風車と比較するとかなり低めであるが、この時ブレードに掛かる遠心力 f は次式で求まる。

$$\begin{aligned} f &= \frac{mrw^2}{g} = \frac{mr \left(\frac{2\pi n}{60} \right)^2}{g} \\ &\doteq \frac{mr \times (0.1047n)^2}{g} \text{ [kgf]} \end{aligned}$$

m : ブレード1本当たりの質量 [kg]

w : 角速度 [rad/s]

r : 回転軸中心から

ブレード重心までの距離 [m]

n : 回転数 [min⁻¹]

g : 重力加速度 9.8 [m/s²]

試作したマグナス風車の風速8[m/s]におけるブレードに掛かる遠心力を求めると、

$$f = \frac{0.873 \times 0.29 \times (0.1047 \times 30)^2}{9.8}$$
$$= 0.255 \text{ [kgf]}$$

となり、同規模の小型プロペラ風力発電機 ($r = 0.6\text{m}$) では、回転数が1000回転 (風速6m/s) のときに283kgf の遠心力が掛かっていることと比べるとわずかな遠心力しか掛かっていないことが分かる。

6. まとめ

フィンを付けた回転円柱ブレードに風を当てるとマグナス効果によって揚力が発生することが確認できた。ブレードの幅をφ48とφ76とで比較した実験では、無負荷時は、φ76の方が弱い風速でも回転を始めたが、風速を上げていくと、φ48と大差はなかった。

実験の条件内では、マグナス風車本体の回転数も垂直軸風車の回転数に比例して増加するが、揚抗比は逆に小さくなった。

負荷状態では風速が大きくなるほどブレード幅の狭い方が回転数が高くなり、発電機の出力も大きくなったが、同規模のプロペラ風車の回転数に比べるとかなり遅い。

マグナス風車の効率を上げるには、揚抗比・ソリディティ比・風速が弱くても、トルク・揚力が大きくなった幅の広いブレードを使用して、円柱の回転速度を増す方法を考えなくてはならない。

揚力の式からブレードを長くする、太くするという方法も考えられるが、同時に抗力も大きくなることになり、結果的に揚抗比が小さくなることになる。

また、負荷を接続した状態で風速が6m にならないと回転できない点も改善する必要があり、小型プロペラ風車並みにカットイン風速を3~4m にするためには、早い時点で円柱を回転させる工夫が必要となる。ただし、円柱を回転させるために選んだクロスフロー型垂直軸風車は抗力で回転させるため、風速以上の周速度が出ない。一方、水平軸は風速の10数倍の周速度を出せるのでベベルギアで横の回転を縦の回転に変換して回転させる方法も考えられるが、構造的に複雑になると同時に強度的な問題、機械的損失も考慮しなければならず、現実的には難しいものがある。

発電機にも工夫が必要で、コイルの巻き数や極数を増やし、増速器の倍率を上げるといった方法も考えられる。その他、様々な方法があると思わ

れるが、更なる学習が必要となるのは明らかである。

今回の実験では3本のブレード全面同時に風が当たってはいないので数値的な誤差はあったかもしれないがマグナス風車としての傾向が見て取れた。一方でこの風車の事をもっと詳細に検証しなければ解決できない様々な問題点、改善点が浮上する結果となった。

謝辞

2年間、電気エネルギー制御科の先生方を始め他の科目でもお世話になった先生、並びにクラスメイトにはお世話になりました。

ポリテックビジョンの際にも他科の先生からコメントや参考にしたい意見を聞いたことは大変ありがたいことでした。

お世話になった方々に深く感謝申し上げます。

ありがとうございました。

【参考文献】

- ・牛山 泉、三野 正洋(1980)『小型風力発電ハンドブック』パワー社
- ・久保 大次郎(2007)『マイクロ風力発電機的设计と製作』CQ 出版
- ・有田 正光(1998)『流れの科学』東京電気大出版局
- ・谷腰 欣次(2002)『トコトンやさしいモータの本』日刊工業新聞社
- ・久保田 浪之介(2007)『トコトンやさしい流体力学』日刊工業新聞社
- ・飯田明由、加藤千幸、村上信博、中山忠彦(2010)「スパイラルフィン付きマグナス風車の空力特性の評価(〈特集〉第14回動力・エネルギー技術シンポジウム)」、『日本機械学会論文集』(B編)76巻763号 pp.380-382
- ・佐藤 司(2008)「マグナス効果を利用した小型風力発電機の開発」、『日本機械学会誌』2008.7 Vol.111 No1076 p.609
- ・株式会社 MECARO「製品紹介」
<<http://www.mecaro.jp/product/>>
(アクセス日: 2015/10)

課題実習「テーマ設定シート」

作成日： 月 日

科名：電気エネルギー制御科

教科の科目	実習テーマ名	
総合制作実習	マグナス風車の試作と検証	
担当教員	担当学生	
課題実習の技能・技術習得目標		
風力発電システムの製作を通じて、設計、製作及び組立・調整技術等の総合的な実践力を身に付けるとともに、発電システムの設計を通して、実践的な電気技術を身に付けます。		
実習テーマの設定背景・取組目標		
実習テーマの設定背景		
本実習では、単に風力発電システムを作成するだけでなく、マグナス効果や発電効率の評価など付加的な要素を実習に取り込むことにより、「ものづくり」の面白さや発展性を理解するとともに、期限までに成果物を完成させることでスケジュール管理の重要性を認識します。		
実習テーマの特徴・概要		
マグナス風車の原理を習得しながら発電システムを試作します。 試作したものは、その特性や効率について評価を行い、問題点や改善方法について検討を行います。		
No	取組目標	
①	マグナス効果について実験をして確認します。	
②	展示可能な構造とします。	
③	発電効率等の検証を行います。	
④	進捗を管理できるように取り組みます。	
⑤	5 S（整理、整頓、清掃、清潔、躰）の実現に努め、安全衛生活動を行います。	
⑥	材料、工具、機器及び部品等については、チェックリストを用いて厳密に管理します。	
⑦	報告書の作成、製作品の展示及び発表会を行います。	
⑧	実習の進捗状況や、発生した問題等については、担当教員へ報告します。	
⑨	想定した動作が行われなかった場合には、問題を分析し、その問題の解決に取り組みます。	
⑩		