

低風速域におけるマイクロ風車の動力性能に関する実験的研究

Experimental Consideration on Power-Performance of Micro Wind Turbine in Low-Wind Velocity

三田 純義・並木 賢太郎^{*}
MITA Sumiyoshi・NAMIKI Kentaro

1 はじめに

現在、地球環境問題をはじめ、石炭や石油等の化石燃料の利用増加による地球の温暖化、また、それら化石エネルギー資源が有限で無尽蔵ではないことなど、様々な問題が深刻化している。そのなかで特に注目されているのが風力発電である。

ここ数年、先進各国では発電能力 1 万 kW を超えるような、大規模な風力発電施設（ウィンドファーム）の建設・計画が相次いでいる。日本でも電力市場の自由化や環境保全や資源循環型社会という考え方を背景にし、風力発電は急速に規模を拡大しつつある。一方、独立電源として小規模風力発電も各種用途に利用されてきた。特に近年、モニュメントや教材用としての直径が小さく定格出力が 1 kW 以下のマイクロ風車の需要が増えている。しかし、市販されているマイクロ風車は定格風速が 10m/s 以上のものが多く、風の強い地域または海沿いの地域ならともかく、内陸部の一年を通して風が弱い地域でのマイクロ風車の利用はあまり実用的ではない。

従来の風力発電に関する研究は、大型風車用のものが主体であったため、大型風車の設計法に適用されている翼素運動量複合理論 (E.H.Lysen (1982)) がマイクロ風車にも適用されている。翼素運動量複合理論は、二次元翼型の揚力と抗力の特性を用いて比較的簡単に設計できるため、中・大型風車からマイクロ風車までこの方法が多く用いられている。そのため、従来の設計に基づいて設計された直径が 800mm 以下の水平軸プロペラ風車では、翼素運動量複合理論に基づいてブレードを設計すると、発生出力が風速に大きく依存するため、風速 10m/s 以下で

出力が著しく低下し、大型の風車と同様な性能を得ることができないということが明らかになっており、翼素運動量複合理論に基づくマイクロ風車の設計には適応限界があるといわれている (徳山, 牛山, 田中 (2000))。また、設計条件である周速比を変化させ、直径 500mm 程度のマイクロ風車の翼面積を変えて行われた実験では、翼断面によるレイノルズ数 (以下 Re 数) が大型風車の Re 数に比べて非常に小さくなるため出力は風速の影響を大きく受け非常に不安定な状態になる。そのため、低風速域でも高い Re 数を維持するために風車のソリディティー比を大きく (翼弦長を長く) するために、今までの設計条件よりも周速比を低く設定することが必要である (徳山・牛山 (2000)) という研究もある。

また、直径 220mm の半径位置における設定角・翼弦長の等しいマイクロ風車では NACA 翼型ブレードの風車よりも、曲面板型ブレード風車の性能の方が良いことがわかっている (三田, 徳原, 松田, 牛山 (2000))。さらに、直径 500mm の風車で翼素運動量複合理論に基づいて設計周速比を $\lambda=6$ で設計した風車の場合でも、曲面板型風車の性能の方が優れていることがわかっている (並木, 三田 (2002))。

そこで、本研究では、実際に直径 500mm のマイクロ風車を翼素運動量複合理論に基づいて設計・製作し、ブレードの翼断面形状 (NACA4418, 曲面)、平面形状 (先細り, 先広がり, 等翼弦長) およびソリディティー比の変化による低風速域 (5m/s 以下) でのマイクロ風車の特性の違いを実験的に調べることを目的とする。

2 風車性能計測装置

2-1 風洞

本研究では開放型風洞を製作した。風洞は、吸入

^{*} 平成 15 年度専攻科電子システム専攻修了
(現 NSデザイン㈱)

口, 吹き出し口ともに一辺が 650mm の正方形で全長が約 3m で, アクリル板とアングル材を組み合わせて製作した. さらに風洞内の風速を安定させるために, 厚さ 90mm, 直径 15mm のハニカムを吸入口から 300mm のところに 1 枚, 吹き出し口から 300mm のところに 2 枚取り付け整流した. 送風方法は, 風洞の吸入口に羽根の直径 600mm の大型扇風機を設置し, インバータによって周波数を制御し, 風速を変えて送風する.

2-2 風車の動力性能計測装置

① 計測装置の原理と仕組み

現在, 多くの電気式微小動力計が開発され市販されている. しかし, 市販されている動力計は摩擦抵抗が大きく, 本実験で使用するマイクロ風車では出力トルクが小さいため風車が回転しない可能性がある. さらに, 動力計を回転している風車の後方に設置しなければならない. しかし, 市販されている動力計の寸法が小さいものでも 100mm×100mm 程度の大きさがあるため, 風車後方の空気の流れに影響を与えてしまう.

そこで本研究では, 比較的容易に微小動力を計測できるロープブレーキ法を応用して, 比較的小さなパワーを自動計測できるパワー計測装置を製作した. 開発した動力計測装置の略図とその構成を図 1 と図 2 に示す.

② トルク検出部

風車を取り付けた摩擦車が回転すると, 摩擦車に巻き付けられた糸には力が働く. ステッピングモータによってボールねじを回転し, 摩擦車に巻き付けられた糸を引っ張り, その糸の引っ張り側に働く力

とゆるみ側に働く力を半導体ひずみゲージによって検出し, その信号を増幅し, A-D 変換して, USB I/O ボードを通してコンピュータに取り込み, 摩擦車に働く力と摩擦車の半径からトルクを求める.

糸に働く力を検出するには, 半導体ひずみゲージをアルミニウムの平板に貼り, その平板の一端は固定し, 他端にひもを取り付け, 片持ちばりとしてひもに働く力を検出する.

③ 回転数検出部

回転数は, 図 1 に示す直径 20mm のアルミニウム円板に 24 個の穴をあけたロータリーエンコーダからの信号を計測用コンピュータに取り込み, 2.5 秒間のパルス数をカウントし, トルクと同様に USB I/O ボードを通してパソコンで処理して, 風車の回転数を計測する.

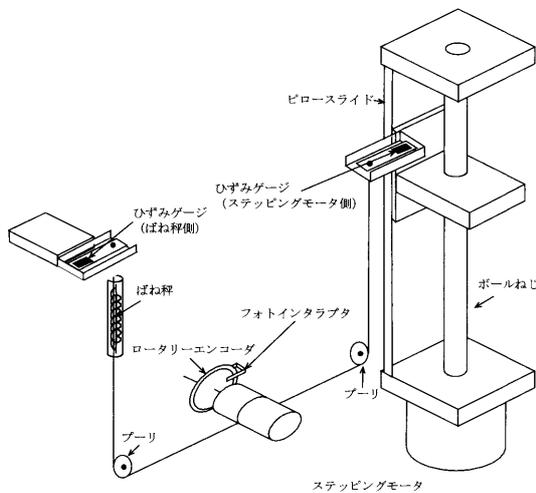


図 1 実験装置

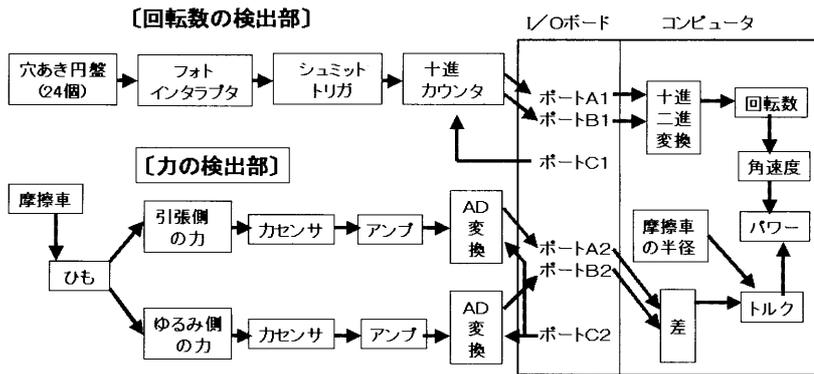


図 2 装置の構成

④ 計測プログラム

トルクと回転数を計測するプログラムは Excel VBA 用いて作成した。計測したトルクと回転数とパワーのデータから無次元化したパワー係数とトルク係数、周速比を算出し、それらを直接 Excel のセルに取り込み、測定対象のパワー特性をグラフにする。図3に作成したマクロのフォームを示す。

開発した微小動力計測装置を風洞の吹き出し口に取り付け、風車の動力性能を計測した。

3 翼断面形状の異なる風車での実験

3-1 風車の設計

本研究では、翼素運動量複合理論からつぎの式に基づいて、直径 500mm 程度の風車を設計・製作した。

$$\text{局所周速比: } \lambda r = \lambda \times \frac{r}{R}$$

$$\text{流入角: } \phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda r}$$

$$\text{翼弦長: } C = \frac{8\pi r}{zC_L} (1 - \cos \phi)$$

$$\text{設定角: } \beta = \phi - \alpha$$

λ : 周速比[m/s] R : 風車半径[m] C_L : 揚力係数 z :
ブレード枚数 α : 迎角[deg] r : 局所半径[m]

3-2 翼断面形状

本研究の実験で使用する風車のブレードの断面形

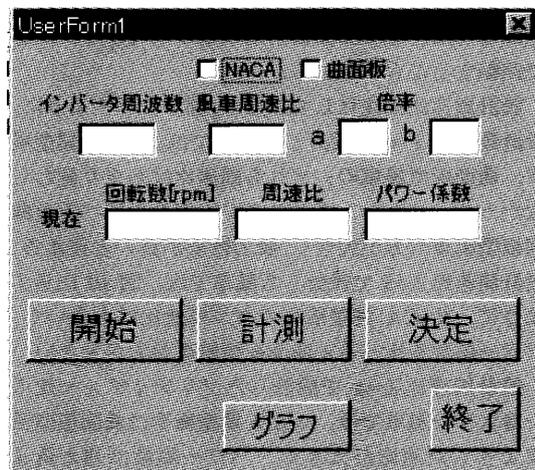


図3 VBA マクロフォーム

状には、NACA4418 翼型と曲面板型を用いた。図4に示す NACA4418 型は翼弦長に応じて、翼厚等の寸法は決まっている。図5に示す曲面板型は、NACA4418 翼型の上部の外形に沿って翼厚を 3mm 程度にした形状である。

この実験では、翼断面形状を2種類、設計周速比 λ を3段階に変えて、計6台の風車を製作した。風車の設計周速比を変えると、ブレードの面積が変化する。風車を正面から見たときのブレード形状を台形とし、その面積と風車が回転しているときの面積（風車ブレードの掃過面積）の比をソリディティー比と呼び、つぎの式で表される。

$$\text{ソリディティー比} = \frac{zS}{A} = \frac{(Ca + Cb)R}{\pi R^2}$$

S : ブレード1枚の面積 [m²] z : ブレード枚数

A : 風車の掃過面積 [m²] R : 風車半径 [m]

Ca : ブレード先端の翼弦長 [m]

Cb : ブレード根本の翼弦長 [m]

3-3 風車の設計条件

翼素運動量複合理論 (E.H.Lysen (1982)) より、次の条件で NACA4418 翼型ブレードの風車を設計した。

- ① NACA4418 翼型ブレードの揚抗比の特性から $C_L=0.8$, $\alpha=4^\circ$ とする。
- ② ブレード枚数は2枚とする。
- ③ 周速比 λ は4, 5, 6の三種類とする。
- ④ 局所周速比より、ブレードの中心から任意離れた位置の流入角を決める。

それぞれ周速比の異なる風車の翼弦長、流入角の計算結果を表1, 2, 3に示す。しかし、製作に際し翼弦長は設計式より算出した結果を翼根から70%

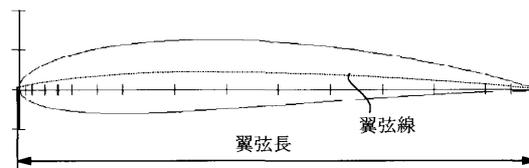


図4 NACA4418 翼型



図5 曲面板型

の位置で線形化する。実際に製作するとき用いる翼弦長を実翼弦長として、同じく表に示す。さらに、設計周速比とソリディティー比の計算結果を表4に示す。

3-4 風車の製作

NACA翼型のブレードと、曲面板型のブレードを表1～表3に示す寸法で作成した。NACA翼型のブレードを製作するには、設計式の計算結果に基づいて、ブレードの元図を翼弦長に合わせて縮小・拡大して、ブレードの型紙を作る。つぎに、ブレードの

表1 $\lambda=4$ のときの翼弦長と流入角

風車半径 [mm]	50	100	150	200	250
翼弦長[mm]	135	107.6	81.1	63.8	52.2
実翼弦長 [mm]	110	94	80	66	52
流入角[deg]	34.2	21.4	15.1	11.6	9.4

表2 $\lambda=5$ のときの翼弦長と流入角

風車半径 [mm]	50	100	150	200	250
翼弦長[mm]	105.2	74.4	53.9	41.8	33.9
実翼弦長 [mm]	72	62	54	44	34
流入角[deg]	30.0	17.7	12.3	9.4	7.5

表3 $\lambda=6$ のときの翼弦長と流入角

風車半径 [mm]	50	100	150	200	250
翼弦長[mm]	82.7	54.1	38.3	29.4	23.8
実翼弦長 [mm]	54	44	38	34	24
流入角 [deg]	26.6	15.1	10.4	7.9	6.3

表4 ソリディティー比

周速比 λ	4	5	6
ソリディティー比[%]	24	18	14



図6 風車の仕組み

半径位置における流入角に合わせて、その型紙を厚さ1mm程度のアルミニウムの薄板に貼り付け、それぞれを翼弦線で2つに分割する。それを型紙に合わせて削り、翼型のゲージを作る。それを合わせながらバルサ材を削りブレードを製作した。また、図6に示すように、2枚のブレードは1枚ずつに分離して直径40mmのハブにねじで固定する。これにより、迎え角を自由に変化させることができる。

3-5 実験条件

翼断面形状とソリディティー比の異なる計6台の風車について、風速と迎え角をつぎのように変えて実験した。

- 風速 : 3.7 [m/s], 4.7[m/s]
- 迎え角 : -1° , 1° , 4° , 7° , 9°

3-6 実験結果と考察

3-6-1 周速比とパワー係数の関係

実験は風速4.65m/sと3.65m/sで行った。迎え角 9° のときの実験結果を図7、図8に示す。風速4.65m/sと風速3.65m/sでの実験結果を比べても、風車の性能は同じ傾向となっていることがわかる。そこで、風速4.65m/sの場合の実験結果について考察する。

設計周速比、迎え角を変化させて実験した結果のうち、実験のねらいがよく現れている結果を図9～11に示す。これらの結果から、風車の設計周速比 λ が小さくなり、ソリディティー比が大きくなるとパワー係数が大きくなる傾向にある。また、NACA翼型風車の周速比は曲面板型風車よりも大きく、高速で回転することがわかる。

設計周速比に注目してみると、図9に示すように、設計周速比 $\lambda=6$ で設計した風車では、NACA翼型風車、曲面板型風車のいずれも周速比はあまり変わらなかった。しかし、両者のパワー係数を比べると曲面板型風車の方が大きく、動力性能が良いと言える。設計周速比 $\lambda=5$ で設計した風車では、図10に示すように、NACA翼型風車の方が周速比は大きい、パワー係数を比べると曲面板型風車の方が大きい。

設計周速比 $\lambda=4$ で設計したソリディティー比の一番大きな風車では、NACA翼型風車は曲面板型風車よりも周速比が大きく、パワー係数は迎え角 $\alpha=1^\circ$ から 7° まではほぼ同じ値を示した。しかし、図11に示すように、迎え角 $\alpha=9^\circ$ の時に曲面板型風

車よりも NACA 翼型風車のパワー係数が大きくなり風車としての動力性能が逆転した。また、この時のパワー係数の最大値は設計条件と同じ $\lambda=4$ になった。

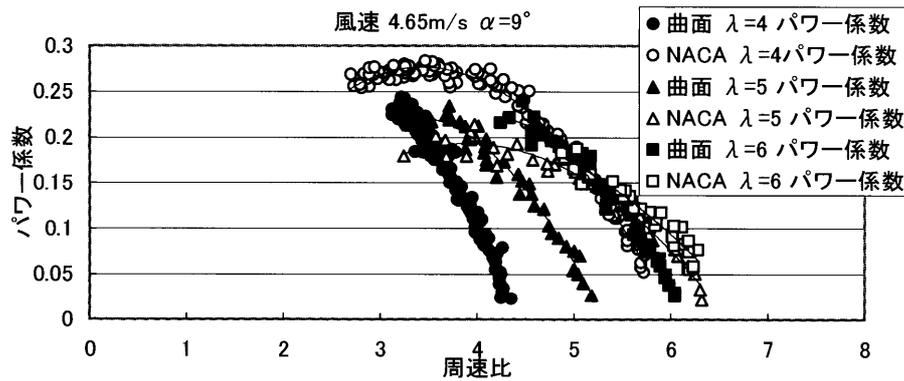


図7 風速 4.65m/s のときの実験結果 (迎え角 $\alpha=9^\circ$)

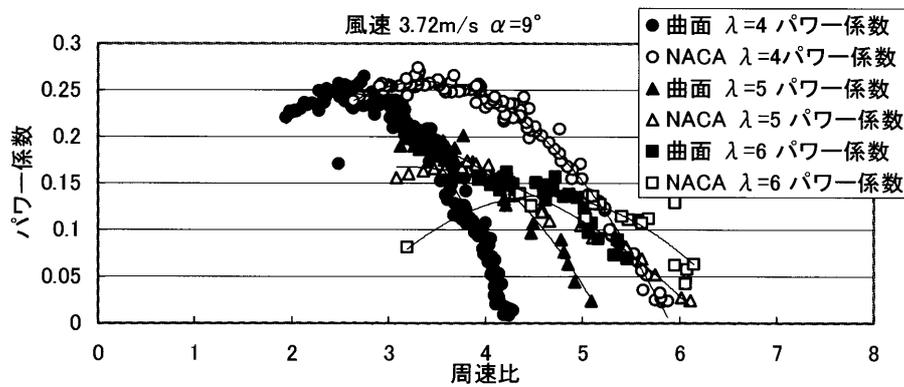
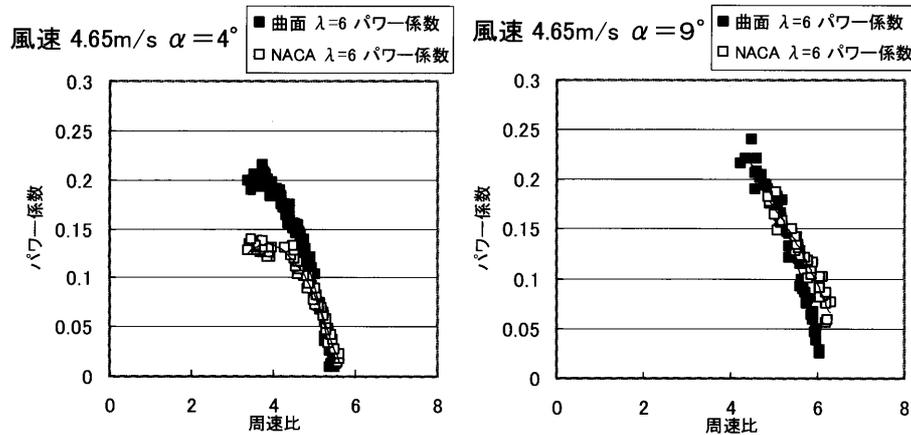


図8 風速 3.72m/s のときの実験結果 (迎え角 $\alpha=9^\circ$)



(a) $\lambda=6, \alpha=4^\circ$

(b) $\lambda=6, \alpha=9^\circ$

図9 設計周速比 $\lambda=6$ のときの周速比とパワー係数の関係

3-6-2 Re 数, 迎え角とパワー係数の関係

迎え角を設計値 ($\alpha=4^\circ$) より大きくした場合 ($\alpha=7^\circ, 9^\circ$) と小さくした場合 ($\alpha=1^\circ$) の実験結果を図 12~図 15 に示す. これらのグラフにおける Re 数は, 風車の中心から 80% の半径位置の周速度と, その翼弦長を基準長さとしたもので, つぎの式で表される.

$$Re = \frac{CrVr}{\nu}$$

Vr : 80% の位置の周速度 $Vr = \omega \times R \times 0.8$ [m/s]

Cr : 80% の位置の翼弦長 [m]

ν : 空気の動粘性係数 [m^2/s]

翼断面形状に注目すると, 曲面板型風車は Re 数が 6×10^4 程度までしか上がらず, 設計周速比を変えてもパワー係数があまり変化がない. しかし, Re 数に注目すると, ほとんどの風車が $4 \times 10^4 \sim 6 \times 10^4$ の Re 数領域で回転しているのに対し, 設計周速比 $\lambda=4$ の NACA 翼型風車だけが他の風車より高い Re 数領域で回転し, 優れた動力性能を示した.

迎え角に注目すると, 曲面板型風車では迎え角 α を 4° より大きくしてもパワー係数の変化はさほど変化せず, $\alpha=7^\circ$ のときパワー係数が最大となった.

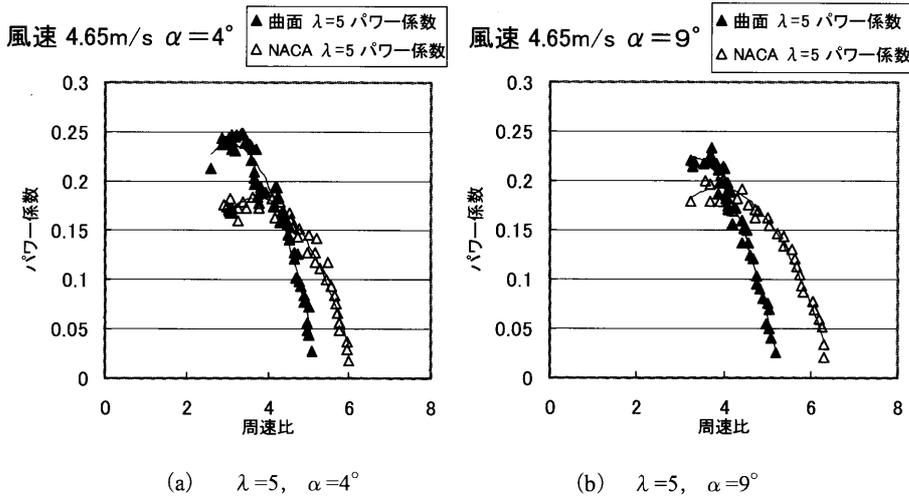


図 10 設計周速比 $\lambda=5$ のときの周速比とパワー係数の関係

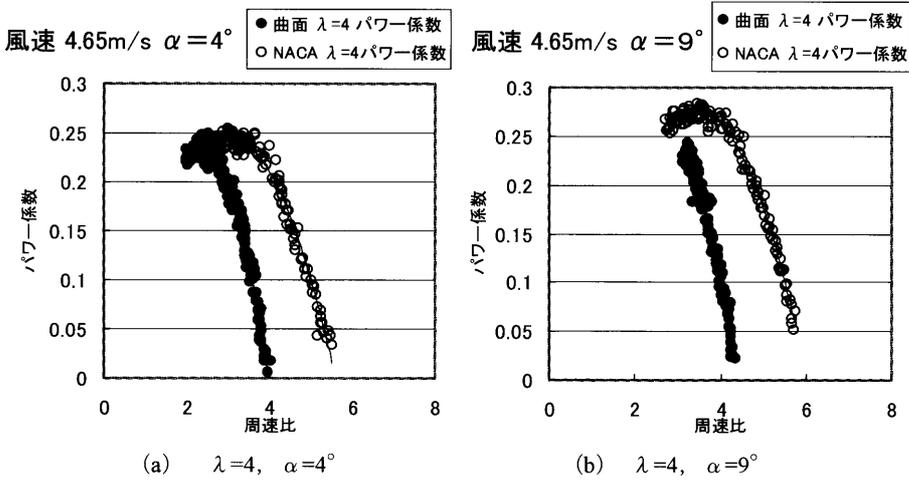


図 11 設計周速比 $\lambda=6$ のときの周速比とパワー係数の関係

しかし、NACA 翼型風車は、迎え角を設計値の $\alpha=4^\circ$ より大きくするとパワー係数も大きくなる傾向にあり、 $\alpha=7^\circ$ では曲面板型風車と同等のパワー係数になり、 $\alpha=9^\circ$ ではNACA 翼型風車が曲面板型風車のパワー係数を越え、動力性能が逆転した。

図 12 に示すように、NACA 翼型風車と曲面板型風車のパワー係数が逆転した設計周速比 $\lambda=4$ 、迎え角 $\alpha=9^\circ$ 、風速 $V=4.65\text{m/s}$ の時にはNACA 翼型風車の Re 数が 9×10^4 程度になった。パワー係数が逆転した理由として、図 16 (大場, 箕造, 森田, 上利 (2000)) からわかるように、NACA 翼型ブレードの揚力・抗力係数および揚抗比の特性が $Re=9 \times 10^4$ 近傍を境に飛躍的に向上するために、NACA 翼型風車の本来の特性が表れたためと考えられる。このことはパワー係数の最大値が設計条件と同じ周速比

$\lambda=4$ 付近に現れたことから言える。

これらのことから、設計周速比を水平軸プロペラ型風車の従来の周速比 ($\lambda=6\sim 8$) より小さくし、かつ、設計迎え角を従来の Re 数が 10^6 オーダでの空気力学的特性 (IRA H.ABBOTT, ALBERT E.VON DOENOFF (1958)) に基づいた迎え角 ($\alpha=4^\circ$) よりも大きくしなければならないということがわかる。

4 平面形状の異なる風車での実験

4-1 平面形状の異なる風車の設計・製作

3-6-2 で述べた結果から、直径 500 mm のマイクロ風車の性能には、翼素に働く Re 数が大きく影響していると考えられる。そこで、NACA4418 翼型風車についてブレードの平面形状を変化させて実験を行った。

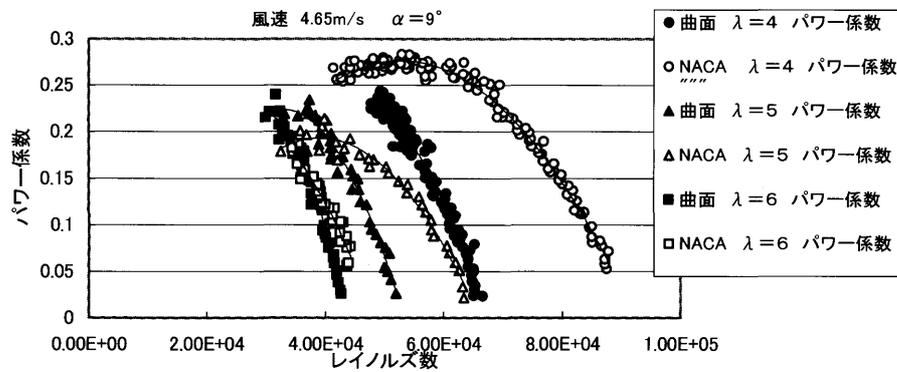


図 12 迎え角 $\alpha=9^\circ$ のときのパワー係数と Re 数の関係

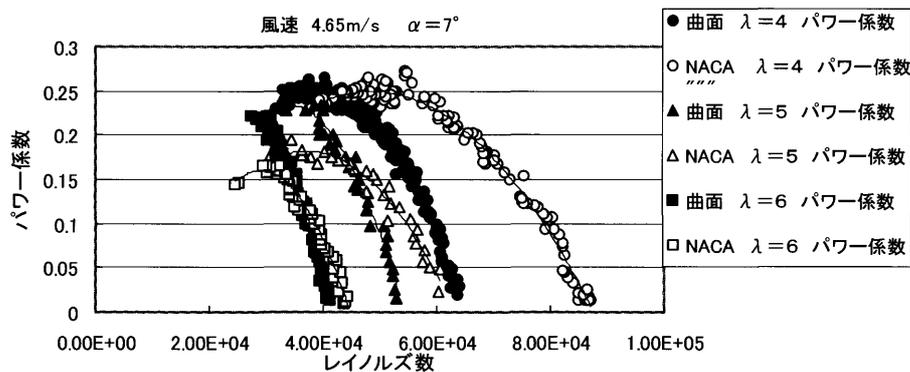


図 13 迎え角 $\alpha=7^\circ$ のときのパワー係数と Re 数の関係

図 17 に示すように, 3-3 と同じ条件で設計した NACA 翼型ブレード形状を「先細り」とし, 各半径位置における翼弦長を逆転させた逆テーパのブレード形状を「先広がり」, また, 翼弦長を 50%の半径

位置における寸法で一定にしたブレード形状を「等翼弦長」とする. それぞれの形状について設計周速比 λ を 4, 5, 6 と変えて風車を設計した.

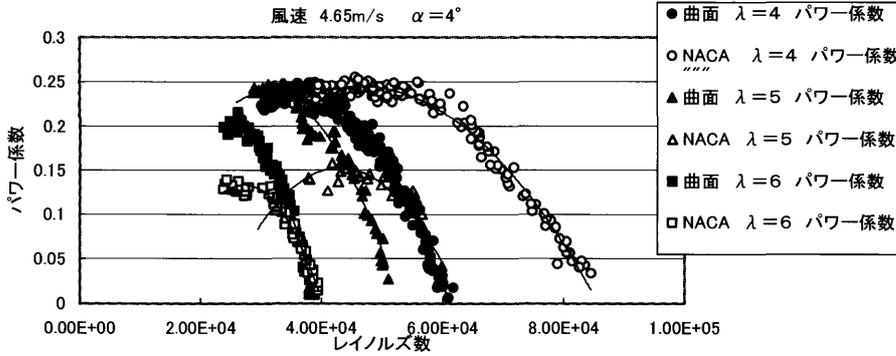


図 14 迎え角 $\alpha=4^\circ$ のときのパワー係数と Re 数の関係

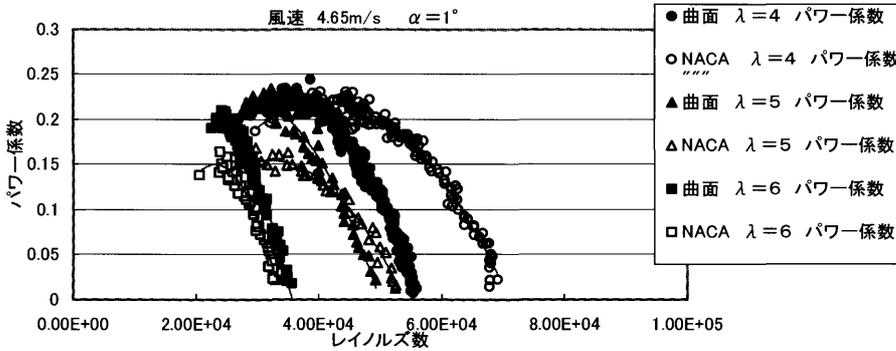


図 15 迎え角 $\alpha=1^\circ$ のときのパワー係数と Re 数の関係

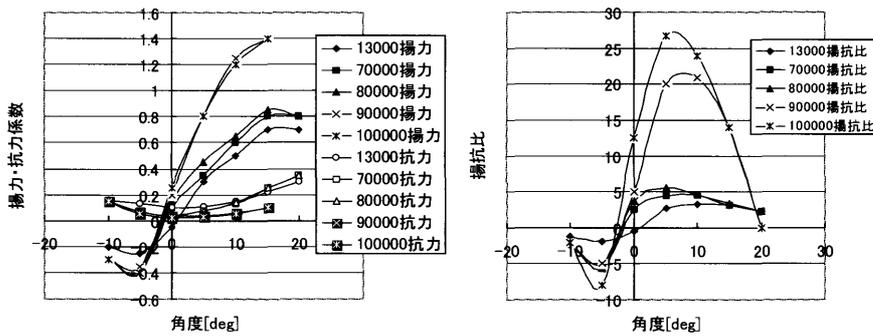
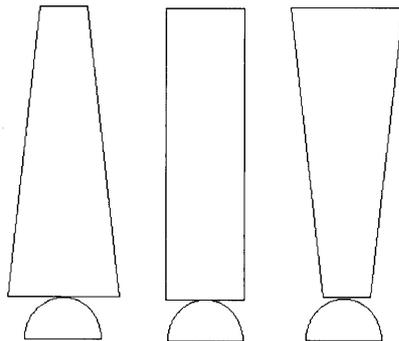


図 16 揚力・抗力係数および揚抗比 (大場, 箕造 (2000) より引用)



先細り 等翼弦長 先広がり
図 17 平面形状の異なるブレード

4-2 実験条件

3-5 と同じ実験条件のもと、NACA4418 翼型について、3 種類の平面形状とソリディティー比の異なる計 9 本の風車について、風速と迎え角をつぎのように変えて実験した。

- 風速：3.7 [m/s], 4.7 [m/s]
- 設定角度の変化量： -3° , -5° , 0° , $+3^\circ$, $+5^\circ$

4-3 実験結果と考察

翼断面形状の違う風車の実験と同様に、実験条件のいずれの風速においても、風車の動力性能の傾向は風速に依存しなかった。また、迎え角については、いずれのブレード形状の風車でも迎え角 7° で性能が安定して良かったので、風速 4.65 [m/s], 迎え角 7° における、設計周速比 4, 5, 6 のブレード形状と風車のパワー特性の実験結果を図 18, 19 に示す。

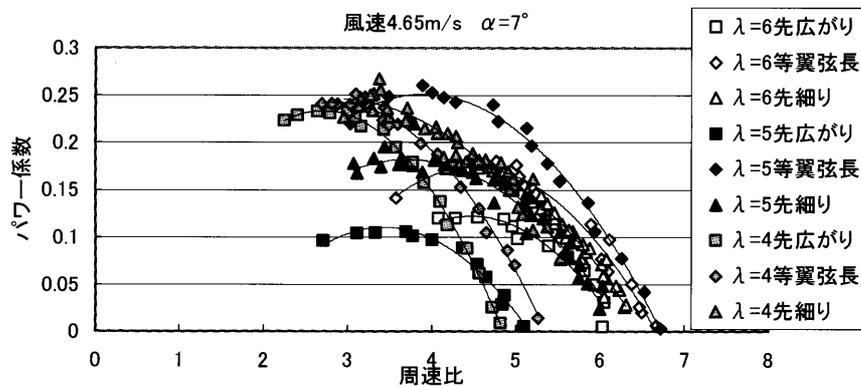


図 18 平面形状の違いによるパワー係数と周速比の関係 (迎え角 $\alpha=7^\circ$)

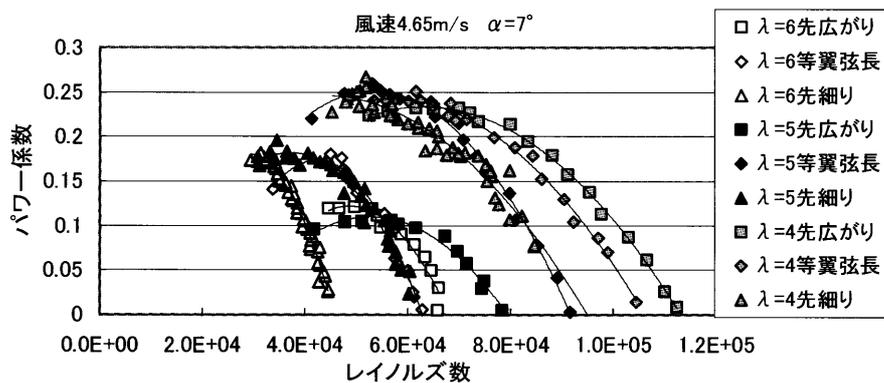


図 19 平面形状の違いによるパワー係数とレイノルズ数の関係 (迎え角 $\alpha=7^\circ$)

設計周速比でみると, 設計周速比 $\lambda=4$ では, 先細りのブレードの風車はもっとも高速で回るが, いずれのブレード形状の風車でもパワー係数の最大値はほぼ 0.25 である. また, 設計周速比 $\lambda=5$ では, 等弦長翼のブレードの風車は高速, 高パワーであり, パワー係数の最大値はほぼ 0.25 である. しかし, 設計周速比 $\lambda=6$ では, どのブレード形状の風車の性能も良くない.

これらの結果から, 低周速域で使う水平軸の風車では, 設計周速比を小さくして設計するとよいことがわかった. また, 最高 Re 数が 9×10^4 を超える風車とそれより小さい Re 数の風車に分けられ, 前者の風車のパワー係数は高く, 後者の風車より性能が良いことがわかる.

以上のことから, 低風速域 (5m/s 以下) で回転する直径 500mm の水平軸マイクロ風車では, 設計周速比を小さく設定し, 翼のソリディティを大きくすることで優れた動力性能を示す. また, NACA 翼型ブレードの揚力・抗力係数および揚抗比の特性が飛躍的に向上する Re 数 9×10^4 を超えるかどうかで風車の動力性能の良否が区分できることがわかった.

5 まとめ

ブレード形状 (断面形状, 平面形状) とソリディティ比 (設計周速比) を変えて, 風車を製作した. 風速 3.72[m/s], 4.65[m/s] の低風速域で実験を行った結果つぎのようなことがわかった.

- ① 低風速域で回るマイクロ風車では, 設計周速比が小さく, ソリディティ比の大きいブレードの風車の性能が良い.
- ② 水平軸風車の性能の良否は, Re 数 9×10^4 を越えるかどうかで区分できる.

6 参考文献

- ① E.H.Lysen : Introduction to Wind Energy, SDW Publication, The Netherlands (1982)
- ② IRA H.ABBOTT, ALBERT E.VON DOENOFF : THEORY OF WING SECTIONS, DOVER PUBLICATIONS INC (1958)
- ③ 進藤 章二郎: 低速風洞実験法, コロナ社 (1992)
- ④ 清水 幸丸: 風力発電技術 [改訂版], パワー社 (1990)
- ⑤ 北川能, 井田進, 中村克考: SI 版 水力学, パワー社 (1998)
- ⑥ 牧野光男: 航空力学の基礎 (第二版), 産業図書 (1989)

- ⑦ Ascher H.Shapiro : 流れの科学 (訳: 分井功) 河出書房 (1977)
- ⑧ 徳山榮基, 牛山泉, 田中俊之: マイクロ風車の最適設計形状に関する研究 (第一報: 現行設計の問題点), 風力エネルギー, 24, 1 (2000), 65-70
- ⑨ 徳山榮基, 牛山泉: マイクロ風車の最適設計形状に関する研究 (第二報: 低風速域用風車形状の検討), 風力エネルギー, 24, 4 (2000), 62-65
- ⑩ 三田純義, 徳原淳, 松田稔樹, 牛山泉: 教育用超小型風車のブレード形状とパワー特性—小動力計の開発と超小型風車 (直径 220mm, 翼弦長 16mm) のパワー特性, 第 22 回風力エネルギー利用シンポジウム (2000), 174-177
- ⑪ 大場謙吉, 箕造麻衣子, 森田泰介, 上利恵三: 低レイノルズ数気流中の翼周りの流れの剥離と翼に働く流体力, 第 11 回バイオエンジニアリング学術講演会・秋季セミナー講演論文集 (2000), 165-166
- ⑫ 並木賢太郎, 三田純義: マイクロ風車のブレード形状とパワー特性の実験的検討, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会講演論文集 (2002), 281-282

小山工業高等専門学校・機械工学科
E-mail:mita@oyama-ct.ac.jp

「受理年月日 2004年9月21日」