

小型垂直軸型風力発電用風車の研究

日大生産工 (院) ○森 陽一郎 日大生産工 石井 進
 (株)シグナスミル 野口 常夫 日大生産工 藤田 優

1. 序論

近年,資源枯渇や環境問題から環境を汚染しない自然エネルギーによるエネルギー取得方法に注目が集まっており,そのひとつとして風力エネルギーによる風力発電がある.わが国における風力発電は年々その発電量が増加する傾向にあり,2010年までの目標量が30万kWから300万kWへと上方修正されている.

本研究では「シグナスミル」と呼ばれる垂直軸型風車に注目している.シグナスミルは年間平均風速の低い地域での小規模な発電を目的としており,本研究ではシグナスミルの各種特性を風洞実験により確認するとともに,高効率化のための考察を行う.

2. シグナスミルの特徴

風車には回転軸の方向で水平軸型と垂直軸型とに大別でき,垂直軸型風車はどの方向からの風でも起動が可能であるという特徴がある.

シグナスミルのブレード断面概要図を Fig.1 に示す.シグナスミルのブレード(翼)断面は腹面が切り取られ「つ」の字の形状となっている.低風速域では風をブレードの切り欠き部で受け起動することにより,揚力型のジャイロミル型風車の欠点を克服している.

Fig.2 は風車の外観である.風車は回転軸,アーム,ブレード,発電機,土台から構成されており,風車回転軸と発電機とは直結されている.風向に対する制御や回転数制御がないため,風車の構造は非常にシンプルなものとなっている.

3. 実験装置および実験方法

3. 1 実験装置

実験装置の概観を Fig.3 に示す.実験で使用した風洞は日本大学生産工学部建築工学科のゲッチンゲン型風洞であり,吹き出し口寸法が2000mm×2000mm,最大ノズル風速60m/sである.風車は回転直径 $\phi=800,1000,1200$ mm,ブレード幅Bについては1200n,1500n,1500sの3種を用意した.ブレード枚数は5枚とした.なお,ブレード

の翼型は NACA2415 であり,翼弦長 c は 1200n,1500n では $c=220$ mm,1500s では $c=250$ mm である.風速の測定は熱線式風速計を用い,風洞吹出口の底面から 2450mm の位置に風速計を設置した.発電機からの交流を整流器により直流に変換し,電力計を介して電子負荷と直接結線した.風車回転数の計測には反射板を発電機に取り付け,光電式回転数計を用いた.

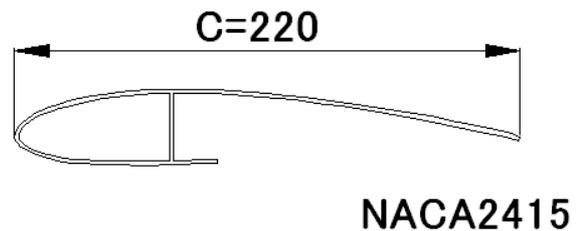


Fig.1 Braid form of CYGNUS MILL

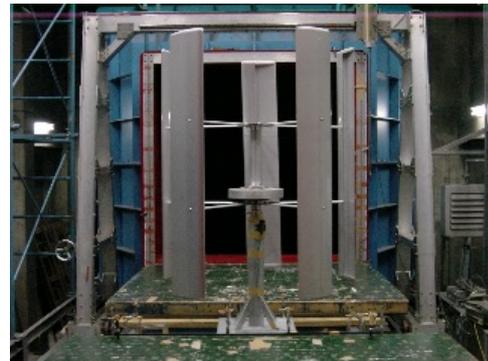


Fig.2 Constitution of CYGNUS MILL

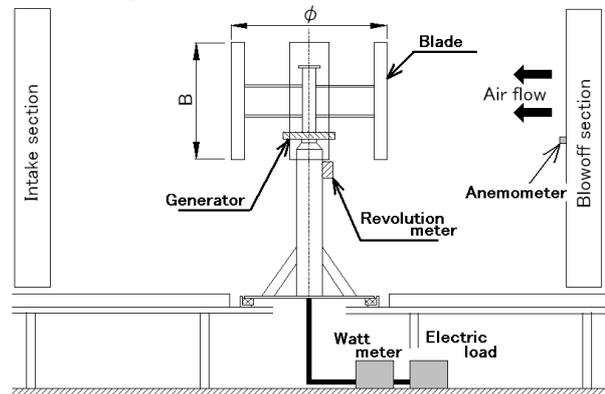


Fig.3 An experimental equipment

Research on a small-size vertical axis wind turbine for power generation

Youichirou MORI, Susumu ISHII, Tsuneo NOGUCHI and Masaru FUJITA

3. 2 実験方法

実験方法は任意の風速 V [m/s]において、負荷を変化させながらその時の電圧[V],電流[A],発電量 P_e [W],回転数 N [rpm]を計測していく。さらに発電量が最大となるような負荷条件(負荷 100%)を確認する。以上の操作を各風速で行った。実験時の最大風速は風車の高回転時における振動を考慮した上で,14[m/s]程度とした。

4. 実験結果

本研究では風車を風力発電システムの構成の一部としており,システム全体の評価を発電特性実験として行っている。よって,以上の風洞実験で得られるデータは発電量 P_e である。風車の特性を知るために,発電効率 η_g を除いた風車の動力 P_{ex} [W]を,以下の式により明らかにしている。

$$P_e = \eta_g \cdot P_{ex} \quad (1)$$

4. 1 風速—風車動力および回転数の関係

Fig.4, Fig.5 に風速 V と風車動力 P_{ex} および回転数 N の関係を示す。なお, Fig.4 はブレード幅 B を同一とし,回転直径 ϕ を変化させた場合, Fig.5 は回転直径 ϕ を同一とし,ブレード幅 B を変化させた場合の図である。横軸は風洞の風速 V , 縦軸は風車動力 P_{ex} および回転数 N である。Fig.4, Fig.5 よりも明らかなように風車動力 P_{ex} の増加には風車回転直径 ϕ よりもブレード幅 B のほうが効果的だと言える。これは同一の風速に対し,ブレードが発生する力がブレード幅 B の増加によって増すためだと考えられる。回転数 N については回転直径 ϕ の増加に伴い,減少する傾向が確認できた。ブレード幅 B の増加に対しては同一の翼弦長のブレードでは大きな差異は見られなかったが,ブレード質量の軽い 1500n の方が 1500s より高い回転数を示した。また回転数変化は線形に近い事が確認できた。他の風車条件についても,以上と同じような傾向が得られた。

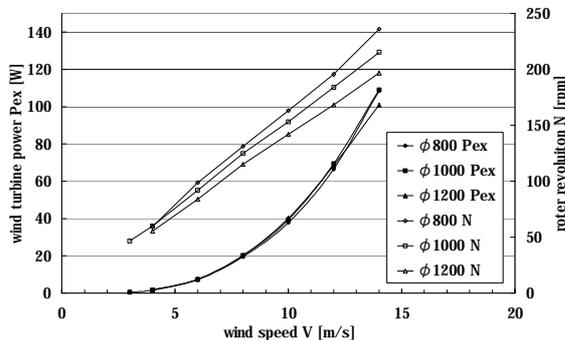


Fig.4 A relation between a wind speed and a wind turbine power($B=1500n$)

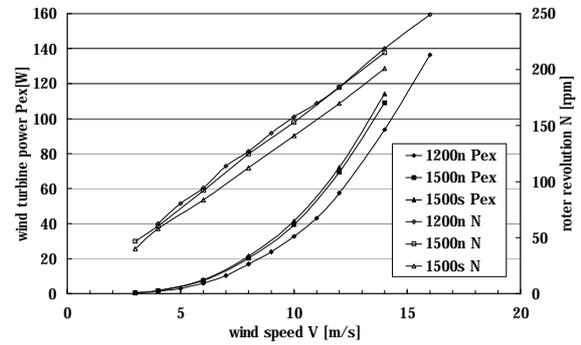


Fig.5 A relation between a wind speed and a wind turbine power($\phi=1000$)

4. 2 風速—周速比の関係

Fig.6, Fig.7 に風速 V と最高出力発生時の周速比 λ の関係について示す。周速比 λ とは風速 V と風車ブレードの接線方向速度 V_r との比である。

$$\lambda = \frac{V_r}{V} = \frac{\omega R}{V} = \frac{2\pi N R}{V} \quad (2)$$

なお, ω : 角速度[rad/s], R : 回転半径[m]である。Fig.6 はブレード幅 B を同一, Fig.7 は回転直径 ϕ を同一とした場合の図である。

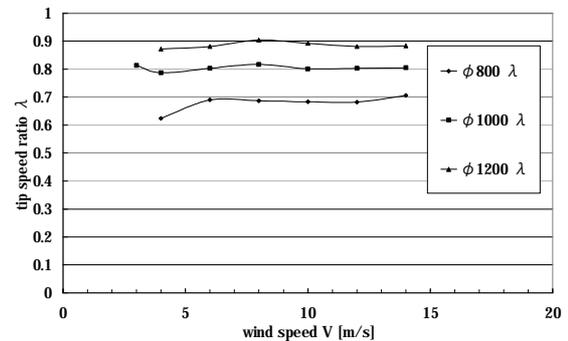


Fig.6 A relation between a wind speed and tip speed ratio($B=1500n$)

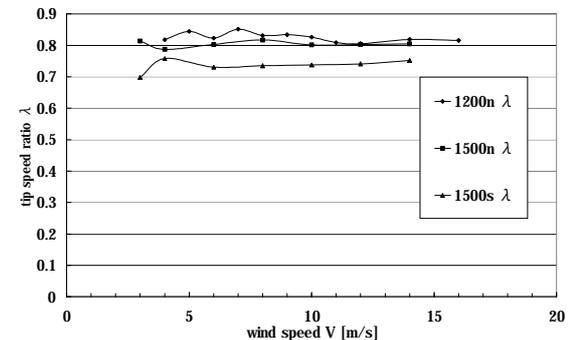


Fig.7 A relation between a wind speed and tip speed ratio($\phi=1000$)

Fig.6, Fig.7 よりも明らかなように, 同一のブレード幅 B では回転直径 ϕ の大きい風車のほうが周速比 λ は高くなるということが言える。また,

同一の回転直径 ϕ ではブレード幅 B よりも、ブレード質量による差異が確認できた。

4. 3 風速-パワー係数の関係

Fig.8, Fig.9 は風速 V とパワー係数 C_p の関係を示したものである。パワー係数 C_p とは風の動力 P_{th} と風の中から取り出せた風車動力 P_{ex} の割合であり、以下のような式である。

$$C_p = \frac{P_{ex}}{P_{th}} = \frac{P_{ex}}{\frac{1}{2} \rho A V^3} \quad (3)$$

なお、 P_{th} : 風の持っている動力[W], ρ : 空気密度 [kg/m^3], A : 風車受風面積 [m^2] である。Fig.8 はブレード幅 $B=1500\text{n}$ の時の回転直径 ϕ の変化である。パワー係数 C_p は回転直径 ϕ が短いほど高い値が確認できた。これは回転直径 ϕ を増加させても風車効率は低下することを意味する。Fig.9 は回転直径 $\phi=1000$ で、ブレード幅 B の変化に対するパワー係数 C_p を示したものである。ブレード幅 1200n と 1500n では低風速域では C_p の差は確認できないが、高風速域ではブレード幅 B の短い 1200n のほうが高いという結果となった。また、どちらの図でも、風速 $8[\text{m}/\text{s}]$ 付近でのパワー係数 C_p の変化が見られた。以上の風車特性は他の条件でも同様であった。

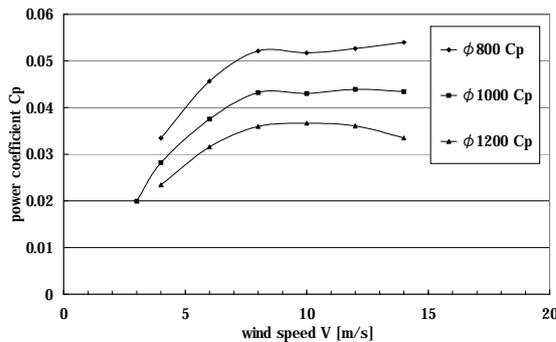


Fig.8 A relation between a wind speed and power coefficient ($B=1500\text{n}$)

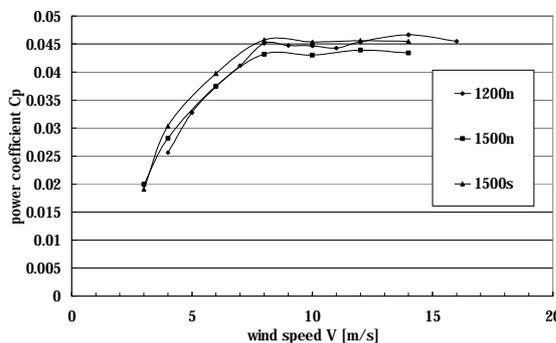


Fig.9 A relation between a wind speed and power coefficient ($\phi=1000$)

5. 考察

本実験では風車の受風面積、つまり回転直径 ϕ とブレード幅 B の組み合わせにより多少の差異はあるものの、 $C_p=0.02\sim 0.05$ であった。ただし、ここで算出したパワー係数 C_p は他の風車の C_p とは比較できない。それは先に述べたように本実験で用いた風車「シグナスミル」では風車を風力発電システムの構成部位のひとつとして扱っているからである。以上を踏まえた上で、ここでは本実験で得られた結果の考察および風車性能改善への対策を検討する。

5. 1 回転直径 ϕ と C_p の関係について

Fig.8 より、風車のパワー係数 C_p は回転直径 ϕ が短いほうが高いということが確認できた。パワー係数 C_p とは風車の効率を意味するので、以上の結果は回転直径 ϕ が短いほうが効率が良いともいえる。これは、Fig.4 の風車動力 P_{ex} が大きな変化がないのに対し、(3)式における受風面積 A が回転直径 ϕ によって増加するためである。同一の風速 V に対してブレードの発生する風車を回転させようとする力は一定であるのに対し、風車の受風面積 A が大きくなるためであると考えられる。風車受風面積 A の増加に伴い、風車の慣性モーメント I_w も増加しているため、無負荷時と負荷 100%における風車の回転エネルギー K を回転直径の変化で比較してみる。回転エネルギー K は以下のような式で示される。

$$K = \frac{1}{2} I_w \omega_{nl}^2 \quad (4)$$

なお、 I_w : 風車慣性モーメント [kgm^2], ω : 風車角速度 [rad/s] である。Fig.10 に風速 V と風車回転エネルギー K の関係を示す。

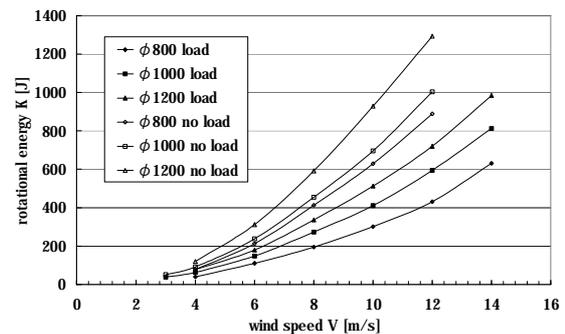


Fig.10 A relation between a wind speed and a rotational energy ($B=1500\text{n}$)

Fig.10 より、回転直径 ϕ の増加に対し無負荷での風車回転エネルギー $K_{no\ load}$ も増加している。また、負荷状態での回転エネルギー K_{load} も増加している。風車は自身の回転数 N を減少させることに

よって動力 P_{ex} , もしくは発電量 P_e を取り出す。Fig.10 においては風車回転エネルギーの減少が電気的エネルギーへの変換という事になる。ここで、回転直径 $\phi=800$ と $\phi=1200$ における、回転エネルギー K の減少率を R_d として定義し、これについて算出した。算出式は以下の通りである。

$$R_d = 1 - \frac{K_{load}}{K_{no load}} \quad (5)$$

算出結果を Table.1 に示す。 R_d 値はその値が高いほど多くのエネルギーを取り出している事を示す。Table.1 より回転直径 ϕ が大きい程、取り出せたエネルギーは少ないという事が言える。このような $K_{no load}$ に対する K_{load} の割合の増加が、結果として風車動力 P_{ex} が変化しないという実験結果を示したと考えられる。

以上から、回転直径 ϕ と風車出力 P_{ex} の増加との間には因果関係は無いということが言える。風車出力 P_{ex} の増加は回転直径 ϕ という因子とは無関係であるので、同一風速によって変化の無いブレードに発生する力が関係していると考えられる。回転直径 ϕ の増加は同時に慣性モーメント I_w の増加ともなるので、今後の実験では回転直径 ϕ とブレード幅 B を同一とし、 I_w を変化させた場合における出力変化について検証する。

Table.1 R_d to a wind speed and ϕ

V[m/s]	R_d ($\phi=800$)	R_d ($\phi=1200$)
4	0.4856	0.3456
6	0.4799	0.4228
8	0.5267	0.4303
10	0.5204	0.4473
12	0.5145	0.4431

5. 2 風速 8[m/s]付近での C_p の変化について

Fig.8 および Fig.9 より風速 8[m/s] 付近でのパワー係数 C_p の変化が確認できた。Fig.4, Fig.5 からわかるように風速に対する回転数 N はほぼ線形の変化をしている。一方、パワー係数 C_p における風の動力 P_{th} は風速の三乗で増加している。風車の動力 P_{ex} は以下のような回転数 N と風車トルク T [Nm] の積で表される。

$$P_{ex} = \frac{2pNT}{60} \quad (6)$$

風速に対し回転数 N は線形での変化を示している。パワー係数 C_p の変化の要因は風車トルク T が原因であると考えられる。低風速域ではブレードは抗力型としての特性を示していると考えられ、ブレード形状を改良する事によって出力向上が期待できる。

5. 2 ブレード枚数と C_p について

今回の実験で用いた風車は回転直径 ϕ とブレード幅 B が異なるものの、全てブレード枚数は 5 枚とした。ここでは枚数とパワー係数 C_p に関する考察を行う。

風車ブレード枚数を変化させるということは、すなわち風車慣性モーメント I_w が変化し、さらにはブレードの発生する力も変化する。どのような枚数においても理想的にブレードに風が当たるとすれば、この力の変化は枚数と線形の関係となるはずである。しかし、風車の枚数が増えるという事はブレード間の距離も変化するという事であり、以上のような線形関係は実際には成立しないと考えられる。

また、ブレードが流体を通過した後は、場合によっては後流の領域が発生し、風洞からの流れと干渉を起こしているとも考えられる。ブレード通過後の後流と風洞からの流れの干渉を Fig.11 に示す。以上のような事よりブレード枚数と風車動力 P_{ex} および慣性モーメント I_w にも関係があると考えられる。

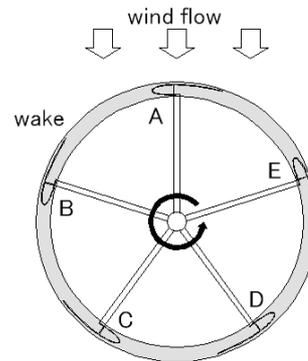


Fig.11 Influence of a wake

6. 結論

- (1) 回転数 N の変化は線形であり、回転直径 ϕ が短いほうが回転数 N は高い。
- (2) 風車動力 P_{ex} については、ブレード幅 B を増加させることにより出力向上が出来る。
- (3) 風車動力 P_{ex} は回転直径 ϕ には依存せず、ブレードが発生する力に依存する。
- (4) 同一のブレードを用いた場合、風車慣性モーメント I_w の増加は、負荷時の自身の回転エネルギー K を著しく増加させ、パワー係数 C_p を低下させる。

「参考文献」

- 1) 牛山泉, 「風車工学入門」, 森北出版株式会社, (2002), pp.48~86
- 2) 森陽一郎, 江口正一, 石井進, 藤田優, 野口常夫, 垂直軸型風力発電用風車の研究, 第 34 回学生員卒業研究発表講演会前刷集, (2004), pp.379~380