



## 小型風車に関する実験的研究 第4報 ―自然風における小形水平軸風車の出力評価について―

メタデータ	言語: jpn 出版者: 室蘭工業大学 公開日: 2014-03-04 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 奥田, 教海, 山岸, 英明 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/1100">http://hdl.handle.net/10258/1100</a>



# 小形風車に関する実験的研究 第4報 ——自然風における小形水平軸風車の出力評価について

奥 田 教 海・山 岸 英 明

## An Experimental Study on a Small Propeller Type of Wind Turbine, 4th Report —— Estimation on the turbine power characteristics in natural winds

K. OKUDA and H. YAMAGISHI

### Abstract

The authors have reported the field test results of a small propeller type of wind turbine in natural winds since 1978. It is confirmed from the results that the wind turbine power has increased proportionally to the third power of wind velocity, also as implied by the wind turbine theory, from the test results of data averaged in each 10 minute time range.

In this paper, the test results are reported for 0.5 kW wind turbine made by Elektro-G. m. b. H. in Switzerland, for natural winds in 1981 and '82. The observed data are consisted of two parts, one is the data of "short" periods for less than one hour, at sampling time intervals for less than one minute and the other the data of "long" periods for about one month, at sampling time intervals for one minute. The former are investigated and analysed for the power-correspondence of the wind turbine to the wind fluctuations in short periods and the latter for estimation of the turbine power characteristics in long periods.

### 1. ま え が き

筆者らは1978年以来、小形プロペラ形風車を風況（風向と風速）の変動する自然風の中に設置して、その出力特性を調べてきた<sup>(1)～(4)</sup>。その結果、10分間連続測定の平均値を整理したところ、風車の運動量理論で予見されているように、風車出力は風速のほぼ3乗に比例することが確認されている。

さらに引続いて本報告では、スイス、エレクトロ社の0.5kW風車を用いて1981年～1982年に実施した自然風中での実験について報告する。実験結果は1分以下のサンプリング周期で1時間以下の期間測定した“短期間記録”と、1分間隔で連続約1ヶ月間測定した“長期間記録”とから成っている。前者は風況変動に対する風車出力の応答性を検討するためのものであり、後者は長期的な風車の出力特性を調べるためのものである。



## 2. 実験結果と実験方法

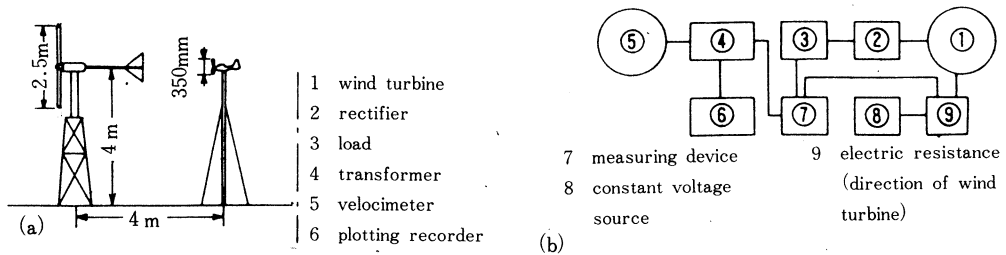


図-1 実験装置

図1(a)に本実験に用いた小形風車と風向風速計の位置関係と主要寸法を示す。供試風車は2枚翼可変ピッチ・プロペラ形（翼断面 Clark Y 翼形）、回転直径2.5mの、スイス、エレクトロ社製風車である。この風車は風速10m/s 前後で遠心錘の作用により可変ピッチ装置が作動して過負荷を防ぐように設計されている。風向風速計は気象観測用の4枚プロペラ形で回転直径は350mmである。図1(b)には装置全体の測定系統図を示す。風車からは風車出力（電圧値）と風車方向およびプロペラ回転数が出力され、風向風速計からは風速と風向が出力され、それぞれデジタル・データ・レコーダやペン書きレコーダに記録される。風車出力（3相交流）は整流器により全波整流されてから、負荷として接続されているニクロム線により発熱放散される。出力の値はニクロム線の抵抗値とその両端の電位差から計算し、リード線や整流器などによる熱損失は無視して考えている。負荷抵抗値は2～12Ωの間で種々テストした結果、約6Ωの場合が供試システムに対して、風速の広い範囲で最もよく風のエネルギーを取得できることがわかったので、常温で約6.3Ωの抵抗値を示すニクロム線を負荷として接続した。一部の測定には、値の異なる抵抗値も用いた。

測定は2種類の方法で行った。1つは1分以下のサンプリング周期で、数10秒から、1時間程度の期間記録、解析する方法で、他の1つは1分のサンプリング周期で、長期間連続して記録、解析する方法である。今回は約1ヶ月間のデータを記録した。前者は風況変動に対する風車の出力応答性や瞬時の特性を検討するためであり、後者は風車出力についての長期的な特性を調べるためのものである。前者の“短期間記録”の場合、記録にはA/Dコンバータ内蔵のパーソナル・コンピュータを用いた。

## 3. 記 号

$Cl(t)$  : 出力係数, 式(1) (—)

$\overline{Cl}$  : 平均出力係数, 式(2) (—)



$\overline{Cl_v}$	: 平均出力係数, 式 (3), (4) (—)
$\overline{Cl}$	: 平均出力係数, 式 (6) (—)
$i, k$	: サンプル数および風速ランクの添字
$M$	: 風速のランク数 (—)
$N$	: 観測期間中の全サンプル数 (—)
$N_v$	: 風速の出現回数 (—)
$P, P(t)$	: 風車出力 (kW, W)
$R$	: 風車回転半径 (m)
$t$	: 時間 (s, min, h)
$V, V(t)$	: 風速 (m/s)
$v$	: 風速の添字
$\epsilon$	: エネルギー変換効率, 式 (6) (—)
$\rho$	: 空気密度 (kg/m <sup>3</sup> )

## 実験結果とその検討

### 4.1 風況変動に対する風車の応答性

自然風にあっては風車の回転翼の慣性モーメントや偏揺慣性モーメントのため、風車は風況の変動に直ちには応答しないものである。このため風況変動の速い成分は風車の挙動に大きな影響を与えないものと考えられる。このことは、風速測定に熱線風速計のような感度のよい風速計を用いた場合、その出力変動に風車の出力が完全には対応しないことが推測される。フィールドにおいて風況観測を行なう場合、測定期間が長くなるため、熱線風速計の使用は技術的に難かしく、実用的ではないように考えられる。実用の面から見れば、供試システムで用いた気象観測用の風向風速計の出力と風車出力の関係を調べるのが、第1段階としては適当と考えられ、(これは他の風車の計測でも一般に行われている) 本報告ではそれに沿って検討を進めた。大きさからみて、風車より風向風速計の方が慣性モーメントは小さくなると考えられ、実用上風向風速計の出力を実際の風況に代えることができよう。本研究で用いた風車の風速変動に対する応答性を調べるため、サンプリング周期0.02秒で記録した風速と出力の関係を検討する。

図2に強風時における時系列記録20秒間を示し、上は風速、下は風車出力の点群である。若干時間的に遅れはあるものの、応答性はかなり良いことがわかる。また図3に、図2のデータの変動周波数成分を見るために、図2に示す範囲でスペクトル解析を行った結果を示す。図3によれば1 Hz 以上の変動周波数成分は問題にならないほど小さく、とくに0.25 Hz 以下(周期4秒以上)の遅い変動周波数成分が顕著に現われている。また図2, 3より、風車と風向風速計との真



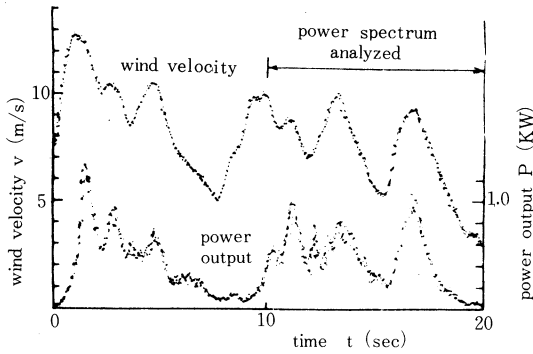


図-2 風車出力の風速への応答性

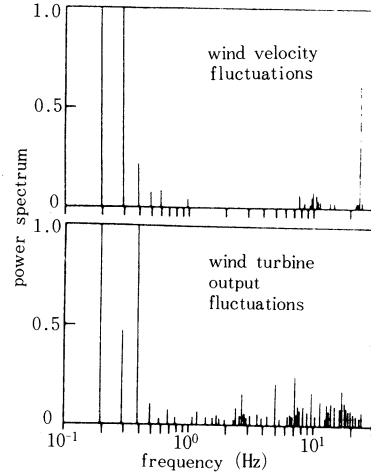


図-3 風力と出力の変動スペクトル

の風に対する感度にあまり差がないことが間接的に示されている。弱風時には風車の風況変動に対する応答性は悪くなることが他のデータより知られている。これらの点から風車の出力評価に対して、風況の速い変動成分は重要な要素にはならないことがわかる。以上、強風時には風車出力の風速に対する応答性はかなり良好であるということが出来る。

## 4.2 平均出力係数

プロペラ形風車の出力係数  $Cl(t)$  は次の式(1)で定義される。

$$Cl(t) = P / (\frac{1}{2} \cdot \pi R^2 \rho V^3(t)) \quad (1)$$

変動する自然風にあっては、各瞬間ごとの  $Cl(t)$  よりも、ある一定期間の平均値として出力係数を定義づけることが現実的に即している。そのような定義の出力係数は、次の式(2)で表わされる。

$$\overline{Cl} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} Cl(t) dt \quad (2)$$

また各風速域ごとの出力係数も次のように定義できる。風速  $V_1$  から  $V_2$  の間の中央値を  $V$  とし、その範囲のデータの出現回数を  $N_v$  とすれば

$$\overline{Cl,v} = \frac{1}{N_v} \sum_{i=1}^{N_v} \frac{P_{v,i}}{\frac{1}{2} \pi R^2 \rho V_i^3} \quad (3)$$

$\overline{Cl,v}$  の定義として式(3)のほかに次の式(4)のようにも表わされる。

$$\overline{Cl,v} = \frac{\frac{1}{N_v} \sum_{i=1}^{N_v} P_{v,i}}{\frac{1}{N_v} \sum_{i=1}^{N_v} \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V_i^3} \quad (4)$$

式(3)と式(4)のどちらを用いても同じ結果を与える。この両式によって風速域ごとの出力係数の傾向を調べることができる。

またある一定の期間全体の  $\overline{Cl}$  を計算するために、式(5)を用いることができる。



$$\overline{C_l} = \frac{1}{N_r} \sum_{k=1}^M (\overline{C_{l,r}})_k \cdot (N_r)_k \quad (5)$$

ここで  $k$  は風速域のランクを示し、 $M$  は風速のランク数である。風速 0 のデータも含むようにすれば式(5)と式(2)は同じ結果を与える。式(2)と式(5)の定義では無風状態が長いほど  $\overline{C_l}$  の値が低く出て、風車の性能の絶対評価ができないことになる。

そこで風車回転面を通過する風のエネルギーに対し、風車の取得したエネルギーの割合をエネルギー変換効率  $\epsilon$ 、ないしは  $\overline{C_l}$  とすれば、次の式(6)のように表わされる。

$$\epsilon = \overline{C_l} = \frac{\sum_{k=1}^M \left( \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} P_{r,i} \right)_k}{\sum_{k=1}^M \left( \frac{1}{N_r} \sum_{i=1}^{N_r} \frac{1}{2} \pi R^2 \rho V_i^3 \right)_k} \quad (6)$$

定常流中ではどのような定義によっても同じ値になるが、自然風の下では定義によって平均出力係数の値は異なってくる。

### 4.3 出力評価に対するサンプリング周期の影響

風車の長期観測にあたり、膨大なデータの処理を、実用上避けるために、一定の時間間隔でデータのデジタル記録を行ない解析することによって性能を評価することができる。それは以下の検討によって明らかにされる。

すでに述べたように供試風車の出力の顕著な変動成分の周期は 1 ～ 4 秒以上であり、この点からもサンプリング周期は 1 秒以下にする必要はないであろう。そこでサンプリング周期を 1、5、60 秒と変えて記録を行ない。出力と風速の 3 乗の値との相関を調べた。表 1 にその結果を示す。サンプリング周期が長くなっても、特に相関が悪くなる傾向は見られない。60 秒を超えるサンプリング周期の検討は行なっていないが、供試風車の場合、60 秒間隔のサンプリングでも短期間の詳しい風車性能評価と同様に、長期間の性能評価が可能であることがわかった。これによって長期間の観測において膨大な量のデータ処理を避けるためには、どの程度粗いサンプリング周期で観測すればよいか、その指針が得られることとなる。

### 4.4 出力評価に対する平均風速の影響

自然風の下で稼動する風車の出力係数に影響を与える要因として、観測期間の平均風速が挙げられる。表 2 に風速の 3 乗の値と風車出力の間の相関を、平均風速を変えて示してある。相関係数は平均風速の増加とともに大きくなっていることが示されている。



表－１ サンプルング周期の影響

time interval for sampling (s)	1	5	5	60
observed time (s)	750	420	61200	61200
number of data	750	84	12240	1020
mean wind velocity ( $\frac{m}{s}$ )	4.6	5.9	5.9	5.9
mean power output of turbine (W)	98.4	42.8	110.8	112.9
correlation coeff. for output v. wind vel.	0.885	0.886	0.820	0.854

表－２ 出力－風速相関係数の平均風速への依存性

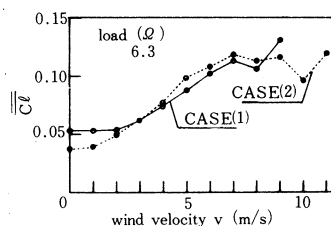
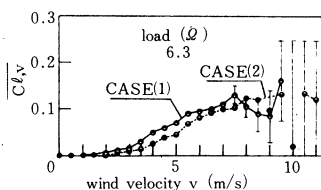
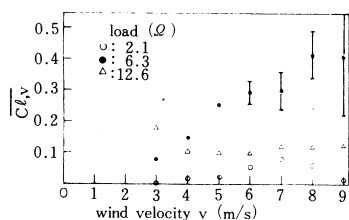
time interval for sampling (s)	60			
observed time (h)	720	24	24	17
number of data	42920	1440	1440	1020
mean wind velocity ( $\frac{m}{s}$ )	1.9	2.1	2.4	5.9
mean power output of turbine (W)	4.3	0.59	1.47	112.9
correlation coeff. for output v. wind vel.	0.495	0.601	0.727	0.851

#### 4.5 平均出力係数 $\overline{Cl_v}$ , $\overline{Cl}$

風車の性能を検討する場合、式(4)の  $\overline{Cl_v}$  と  $\overline{Cl}$  の値によることが適切であろう。そこで無風状態の少ない 1 分間隔の 50 分間の測定（短期）と 60 秒間隔の 1 ヶ月間の測定（長期、この場合 2 例）を行なって  $\overline{Cl_v}$  を求めた。前者を図 4 に、後者を図 5 に示した。図 4 には負荷の相違による  $\overline{Cl_v}$  の変化も併せて示してある。図 4 の負荷  $6.3\Omega$  の短期データと図 5 の長期データの  $\overline{Cl_v}$  の値は大きく異り、風速 5 m/s 以上の範囲で比較すると図 4 の 0.3 前後に対し、図 5 では 0.1 前後となっており、後者の方が明らかに小さい。すなわち短期間のデータのみで長期にわたる出力予測を行なうことは困難である。

図 6 に  $\overline{Cl}$  を示した。横軸には  $\overline{Cl}$  の計算の際考慮する風速の最低値を示し、この数値以下の風速を除いて計算した値が図中の各点の値である。このようにして計算したエネルギー変換効率も、5 m/s 以上の風速で考えると、やはり、0.1 前後の値となった。





図—4 風速区分ごとの平均出力係数 (短期) 図—5 風速区分ごとの平均出力係数 (長期) 図—6 エネルギー変換効率

## 5. 結 論

以上の実験結果から、供試風車について次の諸点が明らかになった。

- (1) 強風時には、風車出力の風況変動に対する応答性はかなり良好であり、それは風車出力、風速の時系列データおよび変動成分のスペクトル解析の結果から明らかである。
- (2) 実用上の出力係数は平均値で求められるべきであるが、平均のとり方で出力係数の意味とその値とが異なってくる。
- (3) 短期観測によって風車の性能を議論する場合、供試風車に対してデジタル記録のサンプリング周期は1秒以下に短くする必要はないことがわかり、観測期間が長ければサンプリング周期は60秒程度でも風車出力係数の評価ができる。これによって、長期間の観測において膨大なデータの処理を避けるためには、どの程度粗いサンプリング周期で観測すればよいか、その指針が得られる。
- (4) 平均出力を予測するための要因として、観測期間全体の平均風速を用いることができる。
- (5) 短期間のデータのみで長期にわたる出力予測を行なうことは困難である。

(昭和60年5月21日 受理)

## 謝 辞

本研究を行なうに当って、当時学生であった小野寺茂、赤根敏文、佐藤裕および細矢東豪の諸君の助力を得たので、ここに感謝の意を表する。また実験室の高橋敏則技官には、データ処理で協力いただいた。厚くお礼申し上げる。なお本研究の一部は昭和55～57年度文部省科学研究費等の補助によるものであることを付記する。



文 献

- 1) 奥田・ほか, 機講論No.780-15, p.233 (1978)
- 2) 奥田・ほか, 機講論No.782-2, p.58 (1978)
- 3) 奥田・ほか, 機講論No.790-10, p.181 (1979)
- 4) 奥田・ほか, 機講論No.810-15, p.79 (1981)