

## On the Response of a Micro Wind Turbine to Wind-Speed Change

烏谷, 隆  
九州大学応用力学研究所

渡辺, 公彦  
九州大学応用力学研究所

大屋, 裕二  
九州大学応用力学研究所

<https://doi.org/10.15017/3554>

---

出版情報 : 九州大学応用力学研究所所報. 127, pp.69-73, 2004-09. 九州大学応用力学研究所  
バージョン :  
権利関係 :



# 小型・マイクロ風車の風速変動に対する応答について

鳥谷 隆\*, 渡辺公彦\*, 大屋裕二\*

(2004年7月30日受理)

## On the Response of a Micro Wind Turbine to Wind-Speed Change

Takashi KARASUDANI, Kimihiko WATANABE and Yuji OHYA

E-mail of corresponding author: [karasu@riam.kyushu-u.ac.jp](mailto:karasu@riam.kyushu-u.ac.jp)

### Abstract

To improve the efficiency of a wind turbine, it is more effective to use high-speed wind. A method collecting wind to get high-speed wind was experimentally studied. It was found that the brimmed diffuser was a good device to get high-speed wind. The brimmed diffuser accelerated approaching wind, and wind speed near its inlet became about 1.7 times. Using this brimmed diffuser, we have made a new micro wind turbine and been carrying out field experiment. In order to realize the properties of the wind turbine in variable-speed wind, we study the response of the wind turbine to wind-speed change. We propose a model of a micro wind turbine and simple formulas for response time. We compare the formulas with the results of the numerical simulation for the model, and get good agreements with each other.

**Key words:** *wind turbine, brimmed diffuser, power coefficient, response time*

### 1. はじめに

近年、風力・波力・太陽光など再生可能な自然エネルギーを利用することが求められており、風のエネルギーを風車によって電気に変換する風力発電は急速に普及し始めた。風力発電においては発電量が風速の3乗に比例するため、発電量を上げるために風速を増加させることが効果的である。また、風の弱い時あるいは地域においても風を集めて高風速を作り出すことにより、風力を利用できるようになり、発電可能時間が増えることが予想される。このような期待のもと、集風効果により風車の出力を増加させる研究がなされてきた<sup>1, 2)</sup>。

筆者らは、各種の中空構造体の内部あるいは周辺流れを研究し、渦による取り込み、強い低圧域の生成など種々の流れ特性を利用して、局所的に風を集めて増速させる集風装置(つば付きディフューザ)を考案した<sup>3, 4)</sup>。この集風装置中に風車、トルク計、回転計、サーボモータを設置し、出力特性を調べる風洞実験を行ってきた。ディフューザの開き角・入り口形状・翼の形状・ハブの径などを調整することにより、風速は近より風速の1.7倍に加速され、風車の出力は風車単

体時のおよそ5倍に増加するという結果を得た<sup>5-9)</sup>。これまでの風洞実験の結果を踏まえ、自然風のもとでの発電特性を調べるために、野外試験用の試験機を製作し、野外試験を実施している<sup>10)</sup>。

小型風車やマイクロ風車では、ピッチ角は固定されており、回転速度は風速により変化する。通常、出力が最大になるように回転速度は風速に応じて制御されるが、発電機などの慣性モーメントにより風速の変化に瞬時に対応できるわけではなく時間遅れが生じ、回転速度と風速の関係は一意ではない。本稿では、時間的に変動する風速の下で風力発電機がどのような振る舞いをするのかを調べるために、その応答性について検討した。

第2章では小型・マイクロ風車のモデルを提案する。3章は風車の静特性と応答時間の関係について検討する。4章はモデルによるシミュレーション結果と静特性から見積もった応答時間の比較を示す。5章はまとめである。

\*九州大学応用力学研究所

## 2. 小型・マイクロ風車のモデル化

風力発電システムは回転軸が固定された剛体回転系と見なすことができる。その慣性モーメントは翼・発電機などに起因する。回転を促すトルクは風により与えられ、発電機に取り付けられた負荷により回転を抑制するトルクが発生する。風車の運動方程式は次式ようになる。

$$I \frac{d\omega}{dt} = T_U - T_L \quad (1)$$

$$T_U = (1/2)\rho A r C_T U^2 \quad (2)$$

$$T_L = R\omega \quad (3)$$

ここで、 $I$ は翼、発電機、軸などを含めた慣性モーメントである。 $T_U$ 、 $T_L$ はそれぞれ風によるトルクと負荷によるトルクである。 $r$ はロータ半径、 $A$ はロータの面積( $=\pi r^2$ )、 $R$ は負荷の強さを表すパラメータ、 $C_T$ は風車のトルク係数である。

風車の性能を特徴づける効率は、風車からの出力と風車に入ってくる風のエネルギーの比をとった出力係数  $C_w$  で表される。出力は風によるトルクと角速度の積となるので、 $C_w$ は次式で表される。

$$C_w = \frac{T_U \omega}{(1/2)\rho A U^3} \quad (4)$$

定常風の時、風車の応答の遅れは効率には関係しないため、 $C_w$ は  $U$ 、 $\omega$ 、 $r$ により決まると予想される。実際、 $C_w$ は無次元量である周速比  $\lambda$

$$\lambda \equiv r\omega/U \quad (5)$$

により、 $\lambda$ の関数として、個々の  $U$ 、 $\omega$ 、 $r$ によらない、普遍的な形状  $C_w(\lambda)$ を持っている<sup>46)</sup>。

同様に、定常風下では翼が発生するトルクのトルク係数も  $\lambda$ のみに依存する。(4)式とトルク係数の定義より、トルク係数と出力係数の関係は

$$T_U(\lambda, U) = (C_w(\lambda)/\lambda)(1/2)\rho A r U^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} C_T(\lambda) &\equiv T_U / ((1/2)\rho A r U^2) \\ &= C_w(\lambda)/\lambda \end{aligned} \quad (7)$$

となる。

運動方程式中の翼のトルクを表す(2)式において、 $C_T$ は定常風下で求めたトルク係数  $C_T(\lambda)$ を使用する。この近似が成立すると期待されるのは、風速や風車の回転速度が変化したときに、風車翼まわりの風の流れは速やかに定常状態の風の流れになると思われることによる。これは、風車の応答の遅れはもっぱら慣性モーメントによるものであると仮定していることを意味する。

風車の発生するトルクは翼の形状や回転速度により異なるが、トルク係数はおおむね Fig.1 のような振る舞いを示す。周速比がゼロの時に小さな値を持ち、 $\lambda$ が大きくなる

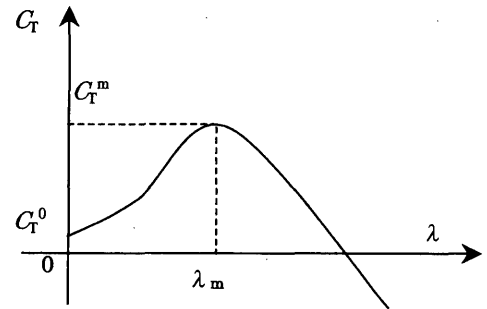


Fig. 1. Schematic diagram of a torque coefficient.

につれて大きくなり最大値をとる(そのときの周速比を  $\lambda_m$ とする)。その後減少し、回転が非常に速いときにはプロペラとして働くことになるので負の値に転じる。この特徴を3個のパラメータ  $C_T^0$ 、 $C_T^m$ 、 $\lambda_m$ で表し、風によるトルクの簡単なモデルとして、次の周速比に対する3次式を用いる。

$$C_T(\lambda) = -(B/3)\lambda^3 + (B/2)\lambda_m \lambda^2 + C_T^0 \quad (8)$$

$$B = 6(C_T^m - C_T^0)/\lambda_m^3 \quad (9)$$

次に負荷によるトルクについて検討する。小型・マイクロ風車では、定格風速以下の時、風速の変化に応じて負荷を制御して効率  $C_w(\lambda)$ が最大になるように回転速度を調節している。 $C_w(\lambda)$ が最大となる周速比を  $\lambda_0$ とする。通常  $\lambda_0$ は  $\lambda_m$ より1割ぐらい大きな値である<sup>57)</sup>。このときの負荷トルク  $T_L$ は、風車が定常に回転しているならば、翼のトルクに等しくなるので、

$$\begin{aligned} T_L &= T_U(\lambda_0, U) \\ &= (1/2)\rho A C_T(\lambda_0) r^3 \omega^2 / \lambda_0^2 \\ &\equiv \beta \omega^2 \end{aligned} \quad (10)$$

となる。ここで、係数  $\beta$ は風速に関係なく、空気密度、風車の大きさ、翼のトルク特性により定まる定数である。すなわち、 $\omega$ に応じて負荷を制御してトルクが  $T_L$ の大きさとなるようにすれば、風車は定常風下において最高の効率を示す周速比  $\lambda_0$ で動作していることになる。このいわゆる「オメガ二乗制御」を模擬するために、(3)式から分かるように、我々のモデルでは負荷  $R$ を調節して

$$R = \beta \omega \quad (11)$$

を満たすようにする。

定格風速を超えた風速に対してどのように制御するのかについては、そのまま同じ制御を続ける、あるいは一定の出力を維持するようにするなどが考えられる。本稿では同じ制御を続けるものとして解析する。

解析は風速を時系列として与え、運動方程式をルンゲ・クッタ法で数値積分することによりおこなう。 $n$ ステップ

目の風速を  $U_n$ , 角速度を  $\omega_n$  とすると,  $n+1$  ステップ目の角速度  $\omega_{n+1}$  を次式で求める.

$$\begin{aligned}\lambda_{n+\delta} &\equiv r(\omega_n + \delta) / U_n \\ k_1 &= \Delta t \{ T_U(\lambda_n, U_n) - R_n \omega_n \} / I \\ k_2 &= \Delta t \{ T_U(\lambda_{n+\kappa_1/2}, U_n) - R_n(\omega_n + \kappa_1/2) \} / I \\ k_3 &= \Delta t \{ T_U(\lambda_{n+\kappa_2/2}, U_n) - R_n(\omega_n + \kappa_2/2) \} / I \\ k_4 &= \Delta t \{ T_U(\lambda_{n+\kappa_3/2}, U_n) - R_n(\omega_n + \kappa_3/2) \} / I \\ \omega_{n+1} &= \omega_n + (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) / 6 \quad (12)\end{aligned}$$

$\Delta t$  は時間刻み, 添え字  $n, n+1$  はそれぞれ  $n, n+1$  ステップ目の値を表している.

次式のように負荷に対して比例制御を行うことにより, 回転数を最適な状態に保つオメガ二乗制御を模擬する.

$$R_{m+1} = R_m - (1/2)(R_m - \beta\omega_m) \quad (13)$$

このモデルでは, 現在の負荷と角速度のみに基づいて制御を行っている. 制御の時間間隔は風車の応答時間の 1/5 程度になるように設定する.

### 3. 起動・応答時間の見積もり

起動に要する時間については以下のように見積もることができる. 一定風速  $U$  の風が吹いているとき, 止まっている状態から回転を始める状況を考察する. 風によるトルク  $T_U$  は, Fig. 1 から分かるように, 回転を始めると周速比  $\lambda_m$  まで周速比の増加とともに増加する. このため, 周速比の増加によるトルクの増加分により回転は加速される.

(1) 式より, 起動時の回転数の増加は

$$I \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \cong \frac{\Delta T_U}{\Delta\lambda} \Delta\lambda \quad (14)$$

と近似できる. 周速比の増加によるトルクの変化を平均勾配で近似すると,

$$\frac{\Delta T_U}{\Delta\lambda} \cong \frac{(C_T^m - C_T^0)(1/2)\rho A r^2 U^2}{\lambda_m} \quad (15)$$

(14), (15)より

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} \cong \frac{(C_T^m - C_T^0)(1/2)\rho A r^2 U^2}{I\lambda_m} \Delta\omega \quad (16)$$

と表すことができる. (16)式より, 起動に要する時間 (静止状態から定常回転数の 63% になるまでに要する時間) は

$$\tau_i \cong \frac{I\lambda_m}{(C_T^m - C_T^0)(1/2)\rho A r^2 U} \quad (17)$$

と見積もることができる.

同様に, 風速の変動に対する応答時間は次のようにして見積もることができる. 風速が  $U$  の時  $\lambda_0$  で定常回転しているとす. 風速が  $U + \Delta U$  に変化した時, 回転速度の変動  $\Delta\omega$  は (1) 式より

$$I \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \cong \left. \frac{dT_U}{dU} \right|_{\lambda_0} \Delta U \quad (18)$$

となる.

周速比を  $\lambda_0$  に保つように制御するので, 周速比は一定に保たれると仮定すると,  $\Delta U$  と  $\Delta\omega$  の間には

$$\lambda_0 = \frac{r\Delta\omega}{\Delta U} \quad (19)$$

の関係が成り立つ. (18), (19)より

$$\frac{\Delta\omega}{\Delta t} \cong \left. \frac{r}{I\lambda_0} \frac{dT_U}{dU} \right|_{\lambda_0} \Delta\omega \quad (20)$$

となる. (20)より 63% 応答時間は

$$\tau_u \cong \frac{I\lambda_0}{C_T(\lambda_0)\rho A r^2 U} \quad (21)$$

と見積もることができる.

この結果は, 起動及び応答時間は共に慣性モーメントに比例し風速に反比例することを示している.

### 4. シミュレーション結果

現在市販されている 500[W] 級 (風速 11[m/s] 時) のマイクロ風車を対象に解析する. 具体的な仕様は次のようなものである.

$$\begin{aligned}2r &= 1.4[\text{m}] \\ \lambda_0 &= 5.0 \\ C_w(\lambda_0) &= 0.40 \\ \lambda_m &= 4.5 \\ C_T^m &= 8.2 \times 10^{-2} \\ C_T^0 &= 2.0 \times 10^{-2} \\ I &= 0.10[\text{kgm}^2] \quad (22)\end{aligned}$$

また, 時間刻みは 0.001[sec], 制御時間間隔は 0.05[sec],

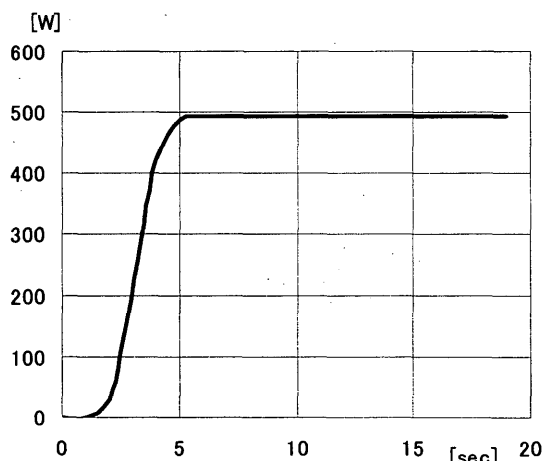


Fig.2 Power of the model at 11[m/s] wind speed.

空気密度は  $1.2[\text{kg}/\text{m}^3]$  として計算した。Fig.2 に風速を  $11[\text{m}/\text{s}]$  に固定したときの出力の様子を示す。風速が  $11[\text{m}/\text{s}]$  の時の出力は  $494[\text{W}]$  である。

#### 4-1. 起動時間

最初に、この風車の起動特性について調べる。Fig.3 に結果を示す。風速を一定に保ち静止状態から定常な回転になるまでの時間を各風速について求めた。凡例の Cal. は (17) 式と風車の仕様 (22) より

$$\tau_i = 16/U [\text{sec}] \quad (23)$$

として求めた値である。数値計算の結果は見積もり値の 1.5 倍になっている。両者の一致はあまりよくないが、風速の変化に対する傾向は同じである。見積もりの式 (17) では、回転数の増加によるトルクの増加を平均の勾配で近似した。しかし、起動の初期は、トルク係数の模式図から分かるように、回転の増加に対するトルクの増加は緩やかである。そのため、式 (17) はトルクの増加を実際より大きく評価したことになり、見積もりの方が小さくなったものと思われる。

#### 4-2. 風速の変動に対する応答時間

次に、風速の変動に対する応答を調べる。風速の変動に対する応答時間はトルク係数 (8) と風車の仕様 (22) を用いて、(21) 式より

$$\tau_u \cong 5.2/U [\text{sec}] \quad (24)$$

と見積もることができる。

風速を段階的に変化させた時の回転角速度の変化を Fig.4 に示す。風速は 10 秒間一定に維持しその後瞬時に  $1[\text{m}/\text{s}]$  増速 (Up) あるいは減速 (Down) させ、また 10 秒間維持するということを繰り返した。

Fig.4 の結果から 63% 応答時間を求め計算値と比較した。Fig.5 に結果を示す。凡例の Cal. が (24) 式を示している。応答時間の見積もりと数値計算の結果は良い一致を示している。この結果、周速比を一定に保つ制御では風車の応答時間は (21) 式で精度良く見積もることができることが分かった。

### 5. まとめ

小型・マイクロ風力発電機の応答特性について調べるために、数学モデルを用いてシミュレーションを行った。モデルでは、翼のトルク係数についてその特徴を 3 個のパラメータで表した。また、制御に関しては、翼の回転を効率のもっとも高い回転に維持するように比例制御を行った。起動時間と風速の変動に対する応答時間を風車の静特性より見積もる簡単な表式を提案した。

シミュレーションより起動時間と応答時間を求め、見積

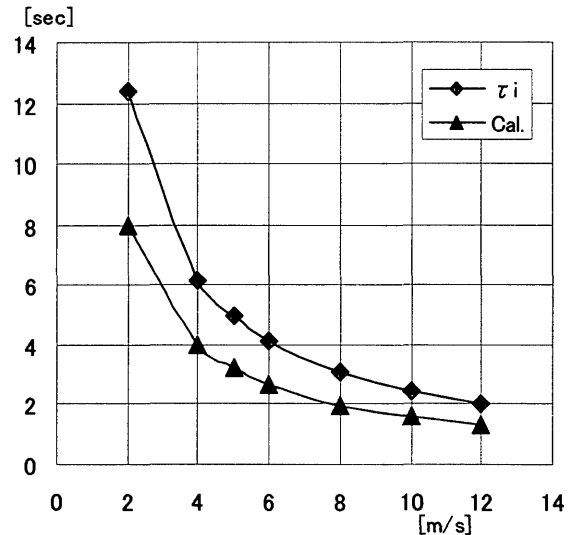


Fig.3 Starting time at each wind speed.

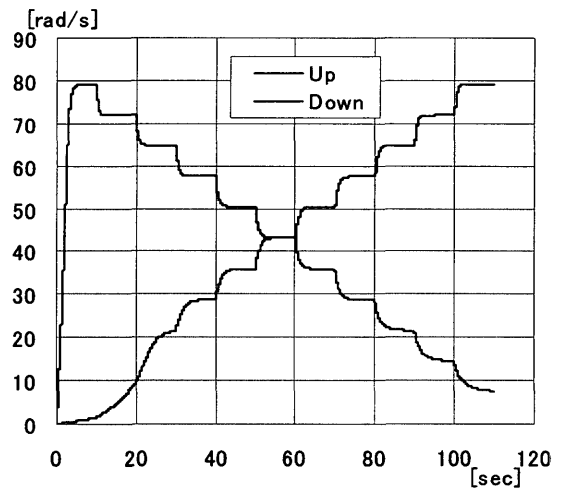


Fig.4 Variations of angular velocity for step increasing and decreasing wind speed.

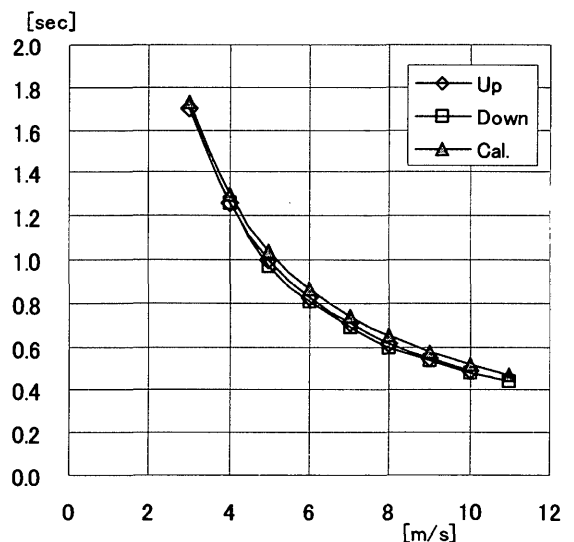


Fig.5 Response time for the change of wind speed.

もりと比較した。起動時間に関しては提案した表式はシミュレーションより求めた値の67%であった。これは、起動の初期における緩やかなトルク増加を無視したためであると思われる。一方、風速の変動に対する応答時間は非常によい一致を見た。

このモデルを用いて、風速の観測データを入力としたとき出力がどのように変化するかを調べ、小型・マイクロ風力発電機の変動風下における性能(効率)を評価するのに適当な方法について検討を行う予定である。

### 謝 辞

一連の研究は、経済産業省大学発事業創出実用化研究開発事業、日本学術振興会科学研究費、吉田学術教育振興会、住友財団環境助成研究、原田記念財団流体機械自然科学研究、(株)九州電力、九州大学P&P研究プロジェクトの支援のもとに行われて来ました。ここに記して深く感謝いたします。

### 参 考 文 献

- (1) Gilbert, B. L. and Forman, K. M.: Trans. ASME, J. Energy Resources Technology, **105** (1983), pp. 46-53.
- (2) 永井 實, 伊良部邦夫: 日本機械学会論文集B, **53**, 489 (1987), pp. 1543-1547.
- (3) 鳥谷隆, 宮尾 圭一, 茶木田 浩, 深町信尊, 渡辺公彦, 大屋裕二: 中空構造体を用いた集風装置による風力発電の高効率化, 九州大学応用力学研究所報, **122**, (2002), pp. 67-71.
- (4) 鳥谷 隆, 大屋裕二, 深町信尊, 渡辺公彦: 中空構造体による集風効果, 日本流体力学会誌, **22**, 4, (2003), pp. 337-343.
- (5) 大屋裕二, 鳥谷 隆, 桜井 晃, 井上雅弘: 風レンズ効果(風エネルギーの集中)による風力発電の高出力化, 第23回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, (2001), pp. 76-79.
- (6) 大屋裕二, 鳥谷 隆, 桜井 晃: つば付きディフューザ風車による風力発電の高出力化, 日本航空宇宙学会論文集, **50**, 587, (2002), pp. 477-482.
- (7) 大屋裕二, 鳥谷隆, 桜井晃, 三浦徳雄: 風レンズ効果(風エネルギーの集中)による風力発電の高出力化, 第24回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, (2002), pp. 165-168.
- (8) 安倍賢一, 大屋裕二: つば付きディフューザ周辺流れの数値解析, 第24回風力エネルギー利用シンポジウム講演論文集, (2002), pp. 219-222.
- (9) 井上雅弘, 桜井晃, 大屋裕二: つば付きディフューザ風車の簡易理論, ターボ機械, **30**, 8, (2002), pp. 46-51.
- (10) 鳥谷隆, 大屋裕二, 渡辺公彦, 深町信尊, 久米宏明, 桜井晃, 井上雅弘: つば付きディフューザ風車の開発 - 野外試験 -, 第25回風力エネルギー利用シンポジウム講演集, (2003), pp. 296-299.