

# 小型風力発電機用汎用コントローラの開発

田村智弘\*, 山田誠治\*

## Development of General-Purpose Controller for Small Wind Power Generator

Tomohiro Tamura, Seiji Yamada

小型風力発電機において風力エネルギーを電気エネルギーに効率的に変換するためには、風車を最大出力点で運転させることが重要であり、そのための制御を行うコントローラが必要である。本研究では、汎用性のある小型風力発電機用コントローラの試作し、模擬風車を用いた実験及び実風車を用いた実験を行うことにより、その有効性を調べた。その結果、降圧チョップ方式の直流-直流変換回路を用いて風車の回転速度が制御できること、それにより風車を最大出力点で運転できることが確認できた。

### 1. 緒言

エネルギー問題及び地球温暖化問題への取り組みが急務となる中、再生可能エネルギーの利活用は大変重要な課題である。また、東日本大震災以降、特にエネルギーセキュリティにおいて、その地域に存在する様々なエネルギー資源（地産エネルギー）の有効活用がますます重要となっている。これに対し本研究では、より身近なところで再生可能エネルギーが利用できる小型風力発電機に着目した。著者らはこれまでに小型風車に関して、風向による姿勢制御が不要である風向に対して回転軸が垂直な直線翼垂直軸型風車を対象として、その風車ブレードの仕様が風車性能へ及ぼす影響を風洞実験により調査してきた<sup>1)4)</sup>。

一方、風力発電機において、時々刻々と変化する風速に対応して風力エネルギーを電気エネルギーに効率的に変換するためには、風車の効率が最大となるように風車の特性と発電機の特性との整合性をとることが重要<sup>5)</sup>である。

そこで本研究では、種々の小型風車に用いることができる汎用性のある小型風力発電機用コントローラを開発し、その有効性を調べることを目的とした。

### 2. 小型風力発電機の制御

#### 2・1 小型風車の特性

##### 2・1・1 小型風車の出力

本開発において対象とした小型直線翼垂直軸型風車を図 1 に示す。この垂直軸型風車が風を受け発生するトルク  $T_{wr}$ [Nm]及び機械出力  $P_{wr}$ [W]は、式(1)、(2)となる。

$$T_{wr} = \frac{1}{2} \rho A r C_T(\lambda) U^2 \quad (1)$$

$$P_{wr} = \frac{1}{2} \rho A C_P(\lambda) U^3 \quad (2)$$

ここで  $\rho$ [kg/m<sup>3</sup>]は空気密度、 $A$ [m<sup>2</sup>]は受風面積、 $r$ [m]は風車の回転半径、 $U$ [m/s]は風速、 $C_T$ はトルク係数、 $C_P$ は出力係数である。ブレード幅を  $b$ [m]とすると、 $A=2rb$  となる。また、 $\lambda$ は周速比でブレード周速度  $r\omega$  ( $\omega$ [rad/s]は風車の回転角速度)

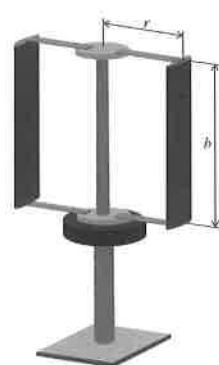


図1 小型直線翼垂直軸型風車

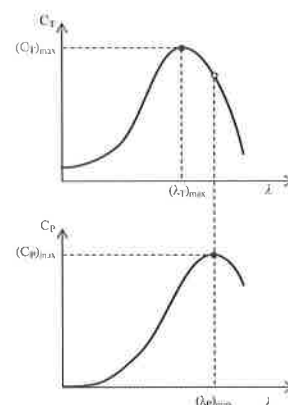


図2 風車のトルク・出力係数

と風速の比  $\lambda=r\omega/U$  である。 $C_T$ 及び  $C_P$ は図2に示すように  $\lambda$  の関数であり、ある周速比  $(\lambda_T)_{max}$  及び  $(\lambda_P)_{max}$  で最大トルク係数  $(C_T)_{max}$  及び最大出力係数  $(C_P)_{max}$  をとる。

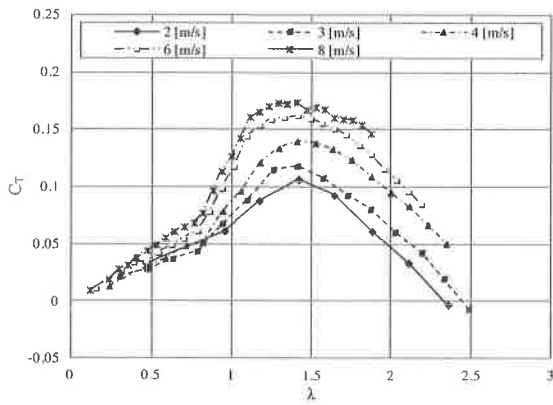
#### 2・1・2 小型風車の風速依存性

一般に大型風車においては、 $C_T$ 及び  $C_P$ の風速依存性は小さいため、風速によらず最大出力が得られる周速比はほぼ一定である。一方、小型風車では、それらは風速に依存し、 $(C_T)_{max}$  及び  $(C_P)_{max}$ 、またそれらをとる周速比が風速によって変化する。図3に小型直線翼垂直軸型風車 ( $r=0.3$ m,  $b=0.6$ m, 翼弦長  $c=0.15$ m, 翼型 NACA6520) を用いて風洞実験により測定したトルク特性及び出力特性を示す。この図より風速の増加と共に  $(C_T)_{max}$  及び  $(C_P)_{max}$  は大きくなり、 $(C_T)_{max}$  をとる  $(\lambda_T)_{max}$  は 1.4 でほぼ一定であるが、 $(C_P)_{max}$  をとる  $(\lambda_P)_{max}$  は大きくなる傾向を示すことがわかる。

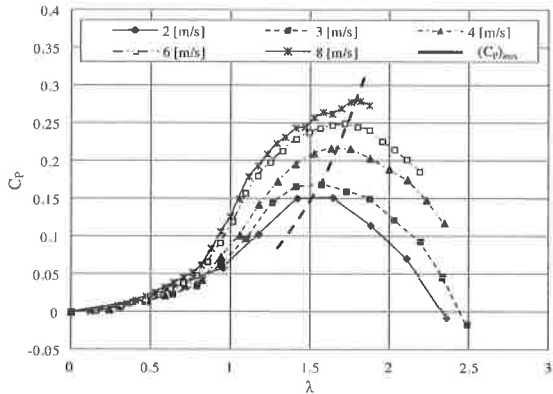
#### 2・2 小型風力発電システムの構成

小型風力発電システムの一般的な構成を図4に示す。風力エネルギーを機械エネルギーに変換する風車、機械エネルギーを電気エネルギーに変換する発電機、風力発電機の制御及びバッテリーや負荷への充放電制御を行うコントローラ、電力を蓄えるバッテリー、電力を消費する負荷から構成される。小型風力発電機が設置されるような地上付近では風況変化が大

\*企業支援部設計制御グループ



(a)トルク特性



(b)出力特性

図3 風洞実験で測定した小型直線翼垂直軸型風車のトルク特性及び出力特性

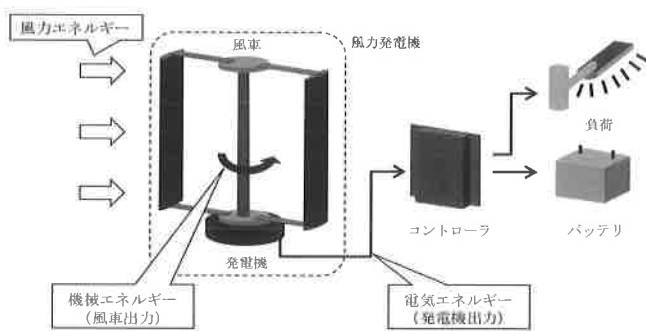


図4 小型風力発電システムの構成

大きく、風車の出力変動が大きいため、バッテリーを用いて電力供給を安定化させることが多い。

### 2・3 小型風力発電機の制御

小型風力発電システムにおいて、風力発電機を制御するコントローラの必要性を検討するため、ここでは図5に示す風力発電機に抵抗負荷を接続した回路について考える。交流発電機と整流器の組み合わせを直流発電機とし、直流モータと同様としてモデル化した。本回路における発電機トルク  $T_g$  [Nm]、発電機逆起電力  $E_r$  [V]は式(3)、(4)となる<sup>6)</sup>。ここで、 $K_T$  [Nm/A]はトルク定数、 $K_E$  [V/(rad/s)]は逆起電力係数、 $r_g$  [Ω]は発電機の抵抗、 $R$  [Ω]は外部負荷の抵抗、 $I$  [A]は回路電流で

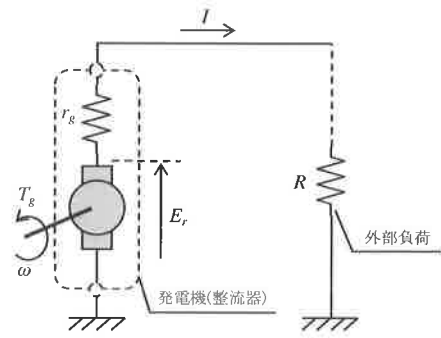


図5 風力発電機に外部抵抗を接続した回路

ある。式(3)、(4)より  $I$  は式(5)となる。また、発電機の機械出力  $P_g$  [W]は、式(3)~(5)より式(6)となる。

$$T_g = K_T \cdot I \tag{3}$$

$$E_r = K_E \cdot \omega \tag{4}$$

$$I = \frac{E_r}{R + r_g} \tag{5}$$

$$P_g = \omega \cdot T_g = \frac{K_T K_E}{R + r_g} \omega^2 \propto \omega^2 \tag{6}$$

一方、風車の最大出力を  $\omega$  の関数で表わすと、式(2)より以下となる。

$$(P_{wt})_{max} = \frac{1}{2} \rho A (C_p)_{max} \left\{ \frac{r}{(\lambda_p)_{max}} \right\}^3 \omega^3 \propto \omega^3 \tag{7}$$

図6に風車及び発電機のトルク・出力特性の概念図を示す。出力特性図において、例えば風速  $U_2$  の時、風車の最大出力点  $A_2$  は、トルク特性図において点  $a_2$  に対応する。ここで発電機のトルク特性を点  $a_2$  を通る直線  $k_0$  とする。風速の大きい  $U_3$  の場合、風車と発電機のトルクがつり合う点は点  $a_3$  となり、この時の風車出力は点  $A_3$  となる。また、風速の小さい  $U_1$  の場合、風車と発電機のトルクがつり合う点は  $a_1$  となり、この時の風車出力は点  $A_1$  となる。いずれの場合も、風車の最大出力である点  $B_3$  及び点  $B_1$  とならず、出力が低下することになる。また、発電機トルク特性を  $k_2$  とした場合、風速  $U_3$  に対してトルクは点  $b_3$  をとり、その時の出力は最大出力点  $B_3$  となるが、風速の低い  $U_0, U_1$  に対しては風車と発電機のトルク特性曲線の交点が存在せず、風車は回転することができない。これらに対し、風速が  $U_3$  に増加した時は、発電機のトルク特性を  $k_2$ 、 $U_1$  に減少した時は  $k_1$  に変化させると、トルク特性はそれぞれ点  $b_3$  及び点  $b_1$  で交点を取り、この時風車の出力は点  $B_3$  及び点  $B_1$  となり、最大出力が得られることになる。以上のように、風車を最大出力点で動作させるためには発電機の特性を風速に応じて制御することが重要であり、そのためのコントローラが必要となる。

実際の制御においては、そのコントローラにより風車の最大出力点で動作させるために周速比が  $(\lambda_p)_{max}$  となるように制御する。特に小型風車においては、図3に示すように、出力特性が風速に依存することから、風速に応じた  $(\lambda_p)_{max}$  に設定することが必要である。

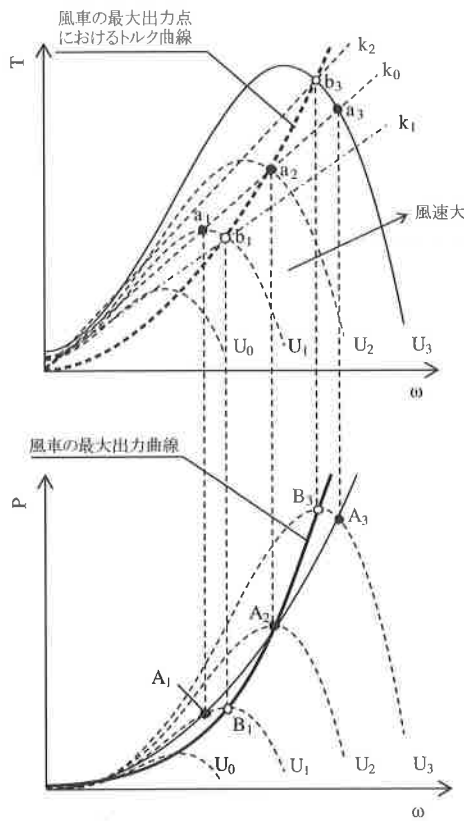


図6 風車及び発電機のトルク・出力特性  
(上：トルク特性，下：出力特性)

3. 小型風力発電機用コントローラの試作

2・3節で述べたように、風力エネルギーを効率的に得るには、 $(\lambda p)_{max}$  になるように発電機の特性を調整し、風車の回転速度を制御する必要がある。風力発電機の運動方程式は、風から風車を受ける力によるトルクを  $T_{wt}[Nm]$ 、発電機トルクを  $T_g[Nm]$ 、風車の回転角速度を  $\omega[rad/s]$ 、慣性モーメント  $J[kgm^2]$  とすると次式のようになる。

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_{wt} - T_g \tag{8}$$

式(8)より、 $T_g$  を制御することで風車の回転速度を制御することができる。ところで、 $T_g$  は式(3)より回路電流  $I$  を変化させることによって制御できる。 $I$  は外部負荷  $R$  により変化するため、発電機に接続される回路の抵抗（インピーダンス）を変更することにより、風車の回転速度が制御できる。このため、コントローラにはインピーダンスを変えることのできる電気回路が必要となる。

電気回路のインピーダンスを電氣的に変化させるための回路には直流-直流変換回路がある。これにはチョップ回路等の非絶縁型の方式や、フライバックコンバータ回路等の絶縁型の方式など様々な回路<sup>7)</sup>があるが、本開発では構造がシンプルなチョップ回路を用いた。チョップ回路には基本形態として降圧・昇圧・昇降圧があるが、本開発ではバッテリー（鉛蓄電池）の公称電圧を 12V、発電機の発生電圧を最大 100V 以上と想定して、降圧チョップ回路を採用した。

図7に基本的な降圧チョップ回路を示す。本回路は、スイッチ  $SW$ 、リアクトル  $L$ 、ダイオード  $Di$ 、コンデンサ  $C$ 、抵抗負荷  $R$  から構成され、スイッチング周期に対してスイッチ  $SW$  がオンである時間の割合  $D$ （デューティ比  $(0 \leq D \leq 1)$ ）を変えることで、負荷側の電圧  $E_2$ 、電流  $I_2$  を変換させることができ、結果として見かけ上回路のインピーダンスを变化することができる。逆に負荷側のインピーダンスを变化させることにより入力側の  $E_1, I_1$  を制御できることになる。また、本回路は  $D$  及びスイッチング周期等の動作条件によりリアクトル  $L$  に流れる電流が 0 とならず連続で流れる「電流連続モード」、電流が 0 になる期間が発生する「電流不連続モード」の2つの状態が存在し、それらの回路は特性が異なる。入力電圧を  $E_1[V]$ 、抵抗を  $R[\Omega]$ 、リアクトルのインダクタンスを  $L[H]$  とすると、それぞれのモードにおける出力電圧  $E_2[V]$  及び入力側の電流  $I_1[A]$  は式(9)~(12)のようになる。

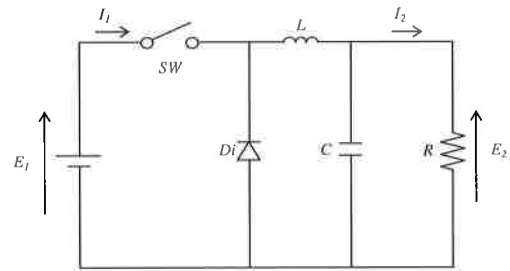


図7 降圧チョップ回路

- ・電流連続モード

$$E_2 = DE_1 \tag{9}$$

$$I_1 = DI_2 \tag{10}$$

- ・電流不連続モード

$$E_2 = \frac{E_1^2 D^2 T_0}{2LI_2 + E_1 D^2 T_0} \tag{11}$$

$$I_1 = \frac{D^2 T_0}{2L} (E_1 - E_2) \tag{12}$$

ここで  $D$  は  $SW$  のオン時間を  $T_{on}[sec]$ 、オフ時間を  $T_{off}[sec]$ 、スイッチング周期を  $T_0[sec]$  とすると次のようになる。

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T_0} \tag{13}$$

このチョップ回路を用いて風力発電機を制御する場合、図7の電圧源  $E_1$  が風力発電機に相当する。なお、本開発においては、整流素子（ダイオード）により交流発電機からの交流出力を直流に整流して、チョップ回路に接続している。発電機トルク  $T_g$  を変化させるためには、式(3)より入力側の電流  $I_1$  を変化させればよい。ところで、式(10)あるいは式(12)より、 $I_1$  は  $D$  により変化する。従って、 $T_g$  はチョップ回路のデューティ比  $D$  を調整して、電氣的にインピーダンスを变化させることにより制御できることがわかる。図8に上記チョップ回路を用いて試作したコントローラの概略図を示す。試作したコントローラは、チョップ回路に加え、その制御と風速・回転数・電圧・電流等のセンサの信号処理及び記録を行う計測制御装置から構成される。チョップ回路は、ソルダーレス・

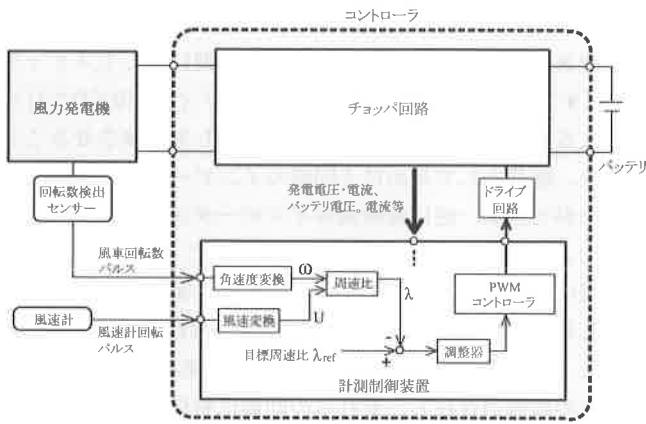


図8 試作コントローラの概略図

ブレッドボード上に構築し、計測制御装置は日本ナショナルインスツルメンツ(株)製制御集録システム(cRIO-9102他)を用いた。コントローラでは、まず風速計と風力発電機の回転数検出センサのパルス信号から風速 $U$ と回転角速度 $\omega$ を算出することにより周速比 $\lambda$ を求め、目標周速比 $\lambda_{ref}$ との差から調整器(PI調整器)により $T_g$ の制御量を決める。この制御量からPWMコントローラでデューティ比を算出し、その値がチョップパ回路のスイッチを駆動するドライブ回路に入力される。チョップパ回路のスイッチング周波数は10kHzである。なお、風力発電システムの構成機器の保護のため、バッテリーの許容充電電圧付近では定電圧制御を行うようにし、また、回転速度・電流の許容値を超えた場合には回路を短絡して風車の回転を停止できるようにした。

4. 試作コントローラの検証

4.1 模擬風車による検証

4.1.1 実験装置及び方法

製作したコントローラの動作確認と風力発電機の制御の有効性を検証するため、風力発電機を模擬した装置(模擬風車)を製作した。模擬風車の概要を図9に示す。風車に相当するサーボモータに三菱電機(株)製HC-KFS43(定格出力400W)、発電機にスカイ電子(株)製SKY-HR160(定格出力100W)を用いた。また、バッテリーには(株)ジーエス・ユアサ製小型制御弁式鉛蓄電池PE12V7.2を用いた。模擬風車を制御するコントローラには上記の試作コントローラと同様の日本ナショナルインスツルメンツ(株)製制御集録システムを用いた。発電機に接続されたサーボモータは、風車を模擬した動作をさせるために、風洞実験により求めた風車のトルク特性に基づき、ある $\omega$ と設定風速 $U$ 、設定風車サイズ $r, b$ から式(1)により計算したトルク $T_{wt}$ となるように制御される。また、発電機トルク $T_g$ は試作コントローラにより制御される。これらの結果、 $\omega$ は式(8)より定まることになる。ただし、ここでの $J$ は、サーボモータと発電機の慣性モーメントであり、実際の風車とは異なる。なお、サーボモータの仕様の範囲において、任意の風車サイズに対する実験が可能である。

この模擬風車に試作したコントローラを接続し、各風速に

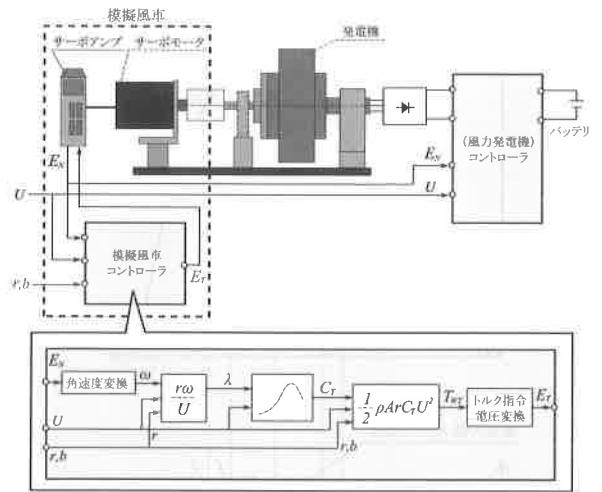
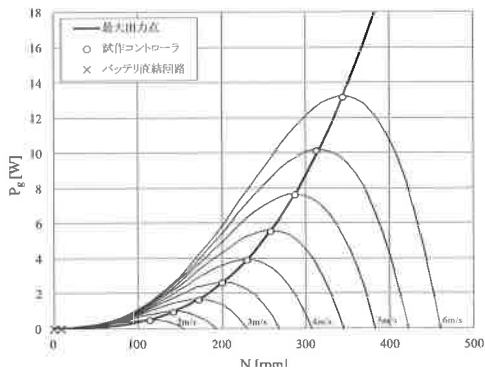


図9 模擬風車の概要

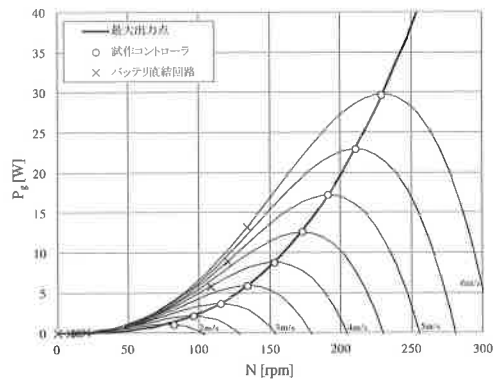
対して風車の最大出力が得られるか検証した。なお、本実験では、風力発電機を制御することの有効性を確認するため、整流器を介して発電機を直接バッテリーに接続した場合(バッテリー直結回路)についても実験を行った。対象とした風車サイズは、ブレードの回転半径 $r$ とブレード幅 $b$ の比率が1:2である $r=0.3, 0.45, 0.5m$ の3種類とし、風速の設定範囲は、 $U=2\sim 6m/s$ とした。また、使用するバッテリーの初期電圧は全ての実験において同程度とした。本実験においては定常特性について評価することとし、各設定風速に対して風車に相当するサーボモータの回転速度が一定になった時の回転速度及びトルクを測定した。これらの値はサーボアンプのモニタ出力機能を用いて取得した。得られた回転速度とトルクから発電機出力 $P_g(=P_{wt})$ を求めた。

4.1.2 実験結果及び考察

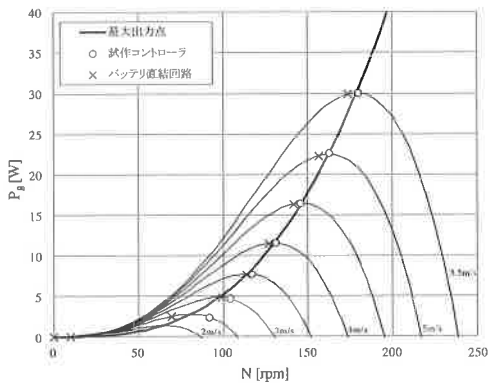
図10に3種類の風車サイズの実験結果を示す。 $r=0.3m$ 及び $0.45m$ の風車は、コントローラを用いることにより、最大出力点で運転されていることが確認できる。 $r=0.5m$ の風車は、風速 $4m$ 以上では最大出力点で運転されているが、それより低い風速においては最大出力点の回転速度より高い回転速度で運転されている。これはチョップパ回路のデューティ比が1(バッテリーに直結状態)の状態であり、これ以上負荷を大きくできないため、回転速度を低下させることができなかったと考えられる。一方、バッテリー直結回路では、 $r=0.3m$ 及び $0.45m$ の風車では、回転速度が増加せず、最大出力が得られていないことがわかる。これは、風車の回転半径が小さい場合、風車の回転トルクが小さくなるが、バッテリー直結回路ではこれに対応して発電機の回転トルクを小さくすることができないためと考えられる。 $r=0.5m$ の風車では、風速が $3m/s$ 以上で概ね最大出力点で運転されている。詳しく見ると、風速 $4m/s$ 以上で最大出力点より若干低い回転数で運転されている。ところで、 $U<4m/s$ の低風速領域において、コントローラを用いた場合に $D=1$ でバッテリー直結状態であるために、それ以上回転数を低下することができないと推定したが、バッテリー直結回路の実験では、回転速度が若干低くなっている。



(a)  $r=0.3m, b=0.6m$



(b)  $r=0.45m, b=0.9m$



(c)  $r=0.5m, b=1m$

図 10 模擬風車による発電機出力

これはコントローラを用いた場合、その回路抵抗によりバッテリー直結回路より見かけ上負荷側の抵抗が大きくなっているためと考えられる。また、 $U=2m/s$  の時、バッテリー直結回路で回転数が顕著に低くなっていることについて図 6 を参照すると、風車と発電機のトルク特性において、トルクのつり合い点が 2 点存在する場合があります、バッテリー直結回路では回転速度の低い方でつり合っていたことが考えられる。

以上のことから、試作コントローラを用いて発電機トルクを制御することにより、風車を最大効率点で運転することが可能であることが検証できた。また、バッテリー直結回路との比較から風力発電機におけるコントローラの有効性が確認できた。なお、 $r=0.5m$  の風車については、本実験の風速範囲内でバッテリー直結回路において風車のトルク特性と発電機のトルク特性が比較的良好に整合していたことになる。

## 4. 2 フィールド実験による検証

### 4. 2. 1 実験装置及び方法

製作したコントローラの実風況下における評価を行うため、実際に風力発電機をフィールドに設置して実験を行った。図 11 にフィールド実験の概要を示す。風車は  $r=0.5m, b=0.8m, c=0.25m$ 、翼型 NACA6525 の小型直線翼垂直軸型風車、発電機は模擬風車の実験時と同等品、風速計は Davis 社製 #7911 を用いた。本実験においても模擬風車による実験と同様に、試作したコントローラとバッテリー直結回路との比較を行った。本実験におけるシステム構成は図 9 と同様で模擬風車が実際の風車に置き換わったものである。実験では、風速、風車回転速度、発電機電圧、バッテリー電圧・電流の記録を 1 秒間隔で測定した。充電電力  $P_c[W]$  は、バッテリー電圧とバッテリー電流の積により求めた。実験時間は、コントローラを用いた実験では約 2 時間、バッテリー直結回路では約 1 時間であった。また、今回のコントローラを用いた実験では、実験時の平均風速が  $2m/s$  程度であったことから、図 2 より目標周速比を  $\lambda_{ref}=1.5$  (一定) に設定した。バッテリーの初期電圧に関しては、全ての実験で同程度とした。

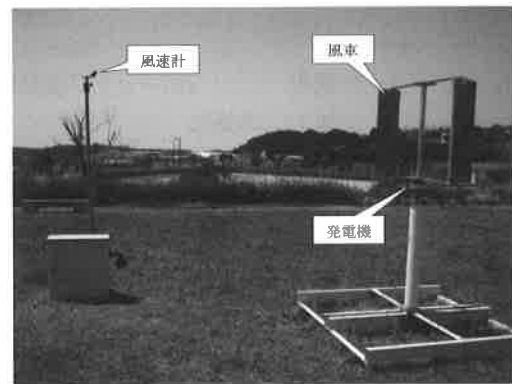
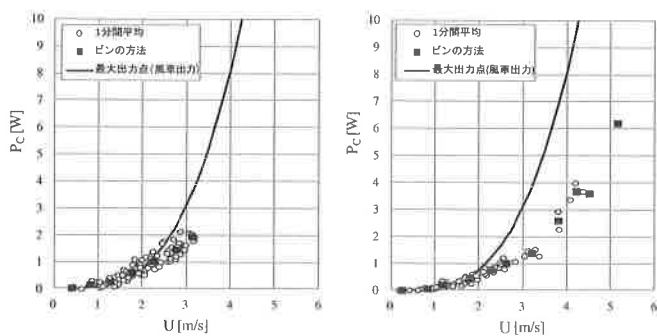


図 11 フィールド実験の概要

### 4. 2. 2 実験結果及び考察

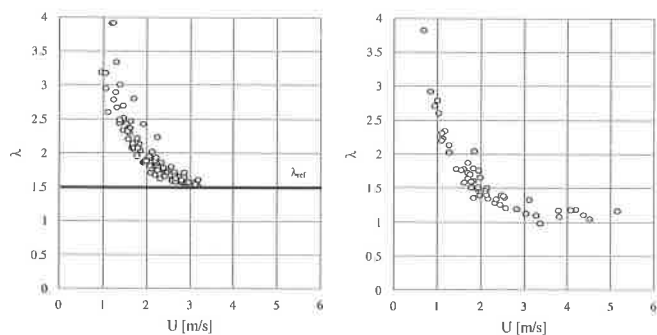
図 12, 13 に(a)コントローラ使用、(b)バッテリー直結回路における充電電力及び周速比と風速の関係を示す。なお、これらの図には測定値を 1 分間平均したものをプロットした。また、図 12 については、ビンの方法<sup>8)</sup>により算出した結果及び風車の最大出力点の推定値も併せてプロットした。コントローラを用いた実験の平均風速は  $1.9m/s$ 、バッテリー直結回路を用いた実験では  $2.0m/s$  とそれらの差異は小さかったが、前者の実験では  $4m/s$  以上の風速の出現がほとんどなく、狭い風速領域での結果となっている。

充電電力  $P_c$  について見てみると、図 12 において、 $U < 4m/s$  のビンの方法による結果を比較すると、コントローラ使用の方が  $P_c$  が大きくなっている。また、コントローラ使用の方が若干ばらつきが大きい。このばらつきが大きいことについて、前述の模擬風車の実験結果から、本システムにおいてコントローラを用いた場合に風速  $4m/s$  より小さい領域では、デューティ比  $D$  が 1 近くになり、制御が有効である時とバッテリー直結状態である時が混在していること、また風速変動に対する



(a)コントローラ使用 (b)バッテリー直結回路

図 12 充電電力



(a)コントローラ使用 (b)バッテリー直結回路

図 13 周速比

風車の応答性を考慮した制御パラメータの調整が不十分であることが原因として考えられる。

次に周速比について見てみると、図 13 からバッテリー直結回路では風速の増加と共に $\lambda$ は低下し1~1.2に収束しており、風車の最大出力が得られる周速比1.5~1.7より小さくなっている。これに対してコントローラを用いた場合は、ばらつきが大きいものの、目標周速比1.5近くに収束する傾向が見られる。ばらつきがやや大きいのは、 $P_c$ のばらつきと同様の理由によるものと考えられる。

## 5. 結言

小型風力発電機用の汎用的なコントローラ開発を目指し、発電機の出力側のインピーダンスを制御して風車の回転速度を調整する電気回路を検討し、コントローラを試作した。また、そのコントローラの動作確認及び風力発電機の制御の有効性を検証するため、模擬風車を用いた実験及び実風車を用いたフィールド実験を行った。以下に結果をまとめる。

- (1) 降圧チョップ方式の直流-直流変換回路を用いたコントローラを試作し、風車の回転速度が制御できることを確認した。
- (2) 模擬風車を用いた実験において、試作コントローラを用いることにより、一部の低風速領域を除き風車サイズに

よらず風車を最大出力点で運転できることを確認した。これに対しコントローラを用いない回路（バッテリー直結回路）では、風車サイズによっては回転速度が増加せず、風車を最大出力点で運転できないことを確認した。

- (3) 実風況下においては、試作コントローラは、ばらつきはあるものの、風車を所定の周速比で運転できることを確認した。一方、バッテリー直結回路は、最大出力が得られる周速比より低い値となり、最大出力点で運転できないことを確認した。

## 6. 今後の課題

今後、試作したコントローラを実用化に向けた課題を以下に示す。

- (1) 低風速領域において、最大出力点で運転できるように発電機、バッテリーを含めたシステムの適正化。
- (2) 風速変動に対する風車の応答性を考慮した制御パラメータの適正化。
- (3) コントローラの評価の信頼性向上のための長時間フィールド実験。

## 参考文献

- 1) 山田誠治, 田村智弘, 望月信介: 小型直線翼垂直軸型風車の性能へ及ぼす翼型の影響 (トルク・出力特性およびトルク変動特性), 山口県産業技術センター研究報告, 22, pp.1-7(2010).
- 2) 山田誠治, 田村智弘, 望月信介: 小型直線翼垂直軸型風車の性能へ及ぼす翼型の影響 (最大反り位置および最大厚み位置), 山口県産業技術センター研究報告, 24, pp.1-7(2012).
- 3) 山田誠治, 田村智弘, 望月信介: 小型直線翼垂直軸型風車の性能へ及ぼす翼型の影響 (前縁半径), 山口県産業技術センター研究報告, 24, pp.8-13(2012).
- 4) Yamada,S.,Tamura,T.and Mochizuki,S.: "Effects of Wing Section on Mean Characteristics and Temporal Torque Variation for Small Straight-Bladed Vertical Axis Wind Turbine", Journal of Fluid Science and Technology,Vol.6, No.6, pp.875-886(2011).
- 5) 牛山泉: 風車工学入門, 森北出版, p55(2002).
- 6) 見城尚志 他: 実験とシミュレーションで学ぶモータ制御, 日刊工業新聞社, pp.2-19(2001).
- 7) 金東海: パワースイッチング工学, オーム社, pp.49-61(2003).
- 8) JIS C1401-12-1, 風車-第12-1部: 発電用風車の性能試験方法, 日本規格協会, (2010).