

一般論文

マイクロプロペラ形風車用高性能ブレードの開発
(フィールド実験機の設置 , 制御ならびに計測)

中	武	靖	仁 ^{*1}
大	崎	邦	倫 ^{*2}
田	中		大 ^{*1}
山	下	友	廣 ^{*3}
内	尾	晃	太 ^{*4}
青	柳	貴	之 ^{*4}
末	次	寛	光 ^{*4}

Development of High Performance Blade for Micro Propeller Type Wind Turbine
(Installation, Control and Measurement of Field Experimental Apparatus)

Yasuhito	NAKATAKE
Kuninori	OOSAKI
Hiroshi	TANAKA
Tomohiro	YAMASITA
Kohta	UCHIO
Takayuki	AOYAGI
Hiromitsu	SUETSUGU

The micro propeller type wind turbine was set up in the rooftop where better wind conditions were available in a campus of Kurume National College of Technology. An automatic remote control and measuring system, which consists of Visual Basic macro program of Microsoft Excel, the application software of Windows, and the controller equipped with RS-232C interface, were developed to control the load of the generator and measure the power generation voltage, the current, and frequency which corresponds to the rotational speed of the wind turbine, and the measured data were automatically stored into each cell of Excel file. The objective of the study is to develop a high performance blade for the micro propeller type wind turbine with using the automatic remote control and measuring system, and this paper presents an outline of the automatic remote control and measuring system.

Keywords : fluid machinery, wind energy, propeller type wind turbine, automatic measurement system

1. はじめに

風力発電は、スケールメリットすなわち大型化することによって得られるメリットが大きく、風況の

良いサイトに設置された場合、火力発電などの従来型発電システムと競合可能な発電コストが得られている⁽¹⁾。環境への影響を勘案すると、発電システムとしての優位性は高く、また、電力系統への連係用として用いられる定格発電出力500kW以上の大型風力発電システムは、一応の完成段階に達している。

しかし、地域分散型独立電源用として期待されている定格発電出力50kW以下の小型風車、特に本研

平成17年 1月20日 受理

^{*1} 久留米工業高等専門学校機械工学科

^{*2} 久留米工業高等専門学校電気電子工学科

^{*3} 久留米工業高等専門学校学生課

^{*4} 久留米工業高等専門学校専攻科生

Copyright 2005 国立久留米工業高等専門学校

究で対象としているような1kW以下のマイクロ風車の領域になると、総工費に見合うだけの出力がほとんどの場合得られていない。そのため、風力発電システムは小型ほど、システム自体が簡素化される傾向にあり、実際に、小型風車では、ピッチ制御装置を有しないことによる出力係数が低下し、ヨー制御装置を有せず尾翼により風向き方向を制御し、さらに地上に近いほど風が不安定になるため装置本体および支柱（ポール/タワー）に振動が生じ、さらに、より住宅近郊に設置されるためロータブレードの風切り騒音・安全性の問題が生じるなど、課題が多く残されている。

また、従来の風車用ロータブレードに関する研究は、航空機の翼を転用することが中心であったが、近年の大型風車では、厚翼に代表されるような風車専用翼が研究され、実際に使用され始めている⁽²⁾。しかし、小型風車に適したブレードの研究・開発はほとんどなされておらず、高出力および低騒音を兼ね備えた高性能ブレードに関する研究は行なわれていない。

そこで本報では、マイクロプロペラ風車用高性能ブレードに関する研究の第1段階として、マイクロプロペラ形風車フィールド実験機の設置、発電機への負荷制御ならびに出力計測システムを構築したので報告する。

2. 風力発電機の概要

写真1に本風力発電フィールド実験機の外観写真を、図1に風力発電機の概略を示す。本実験で使用した風力発電機は本校機械・材料棟屋上（地上から高さ15.1m）西側に設置されており、屋上から高さ5.8mの箇所、また、高さ4.2mの箇所に太陽光発電パネルをもった風力・太陽光ハイブリッド発電装置である。なお、本報では風力発電機のみを研究対象とした。

表1に本研究に用いた風力発電機の仕様を示す。その特徴の1つは、定格出力・定格風速から計算される出力係数（風車回転面での風の持つエネルギーに対する風力発電機出力の比）が0.166であり、系統連係用として一般的に使用されている大型風力発電機の出力係数0.4～0.45と比較すると、かなり低いことが挙げられる。しかしこの値は、マイクロ風車の出力係数としては、ごく一般的な値である。出力係数が低い理由は、本風車のブレードが、大型風車で採用されているようなブレードの各半径位置で

最適な翼弦長およびピッチ角を持つように設計される理想的なテーパーブレードではなく、根元部から先端部までピッチ角が8°一定で、さらに翼弦長が線形化されているテーパーブレードのためである。

3. フィールド実験機の設置

マイクロプロペラ形風車用高性能ブレードの開発にあたり、本風力発電機を風況が良い屋上に移設した。本風力発電機は、これまで本校メインストリート南側すなわち周りを障害物に囲まれた地上に設置されていたため、風速が弱くしかも風向が不安定で、風況が良くない立地条件であった。屋上への移設に際して、屋上の広範囲にわたり太陽光発電装置が設置されており、本フィールド実験機を据付けるための場所的スペースが充分でなく、基礎の設計から行なう必要が生じた。風力発電機の基礎の設計および設置に当たり、「建築基準法施行令第3章第87条」（平成12年6月1日試行）により、風車支柱および風車トップすなわち風力発電機本体に作用する風圧力（荷重）を算出した。

本風力発電機の固定・支持方法は、図1に示されるように、ガイワイヤー方式と呼ばれる。すなわち、風車ロータ・発電機などを支持する1本の支柱（ポール/タワー）と4方に張った4本のワイヤーによるものである。

表2に基礎の設計に際して作成したExcelシートを示す。表3-1～6に計算に使用したコンクリート、鉄筋および鋼材の材料特性を、表4-1、2に風車の設置地域に対する地表面粗度区分およびガスト影響係数を示す。本フィールド実験装置の立地条件より表4-1の の区域を選定し、その風圧力による長期的な応力と地震による短期的な応力に耐える曲げ特性とせん断特性について計算し、実験装置の基礎構造および位置について決定した。

4. 風力発電機へかかる負荷の制御、出力・回転数計測

風力発電機の性能を評価する場合、周速比すなわち風車のブレード先端速度と風速の比で表される無次元の特性係数と、出力の関係を測定する方法が一般的である。そのため各風速下における周速比は、発電機にかかる負荷を制御することにより調整する必要がある。本風力発電機の制御および計測システムの特徴は、LANを用いた遠隔制御計測システムである。具体的にはWindowsのアプリケーションであ



写真1 風力発電フィールド実験機の外観写真

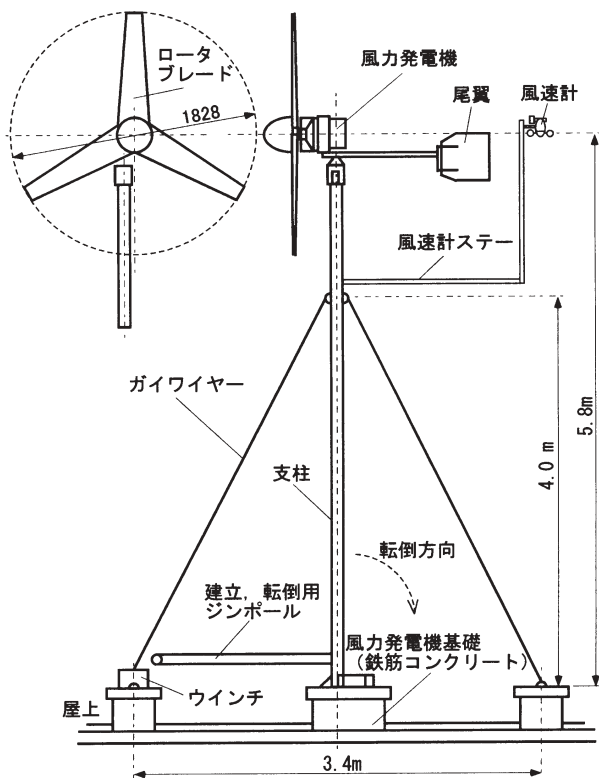


図1 風力発電機の概略

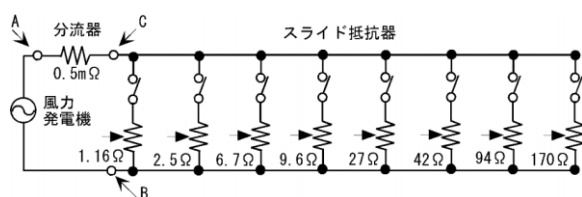


図2 回路図

るMicrosoft ExcelのVisual Basicマクロを利用して、RS-232C(シリアル)インターフェイスを装備した制御装置によって外部機器(風力発電機にかかる負荷)の制御を行い、発電機の発電電圧・電流および周波数(風車の回転数に対応する)をExcelの各セルに取り込む自動計測システムである。計測制御用のパソコンをVNCというソフトウェアで学内LANに接続されたパソコンから操作することで、遠隔制御を実現する。

図2に実験回路図を示す。本回路は、風力発電機にかかる負荷を調節するために、8個のスライド抵抗器を並列に接続し、それらのON/OFFの組み合わせにより、28通りの負荷に設定することができる。図3にシリアル通信制御基盤の概略図を示す。本研究では、通信規格としてRS-232Cを採用した。RS-232Cは一般的なパソコンに採用されており、高速伝送を必要としない計測制御に最適な通信規格である。

表1 マイクロ風力発電機の仕様

製品名：ウインドチャージャー FM1800 (英国)	
項目	仕様
ロータ直径	1.83m
定格出力/定格風速	250W/9.84m/s
ブレード枚数	3枚
ブレード材質	ポリウレタン/GRP 積層材
ブレード断面形状	NACA4415
ブレード取付角	8° 一定の振りなし
発電開始風速	3 m/s
耐風速	60 m/s
過回転制御	尾翼自動ファールリング

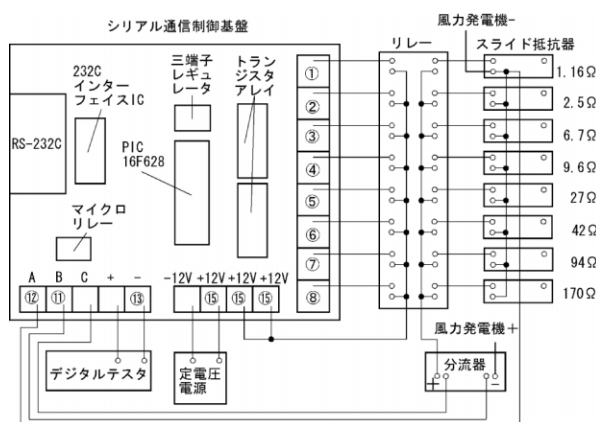


図3 シリアル通信制御基盤

表2 基礎の設計

【1】 支柱軸力								
風力発電機FM1800	回転直径 D	1.830	m		1機	62	kg	607.6 N
太陽電池GL136N	335×1218×2枚	0.816	m ²		1機	5.51	kg	53.998 N
支柱高さ	h	5.300	m		1本	35.93	kg	352.099 N
外径	d	0.089	m	(表3-6参照)				
厚さ	t	0.003	m					
密度	ρ	7850.0		軸力N	Σ	103.44	kg	1013.697 N
【2】 地震力								
係数	C ₀	0.300						
地震力	q = C ₀ ・N	304.1	N					
【3】 風圧力								
平均風速の鉛直分布係数	E _r	1.110		(表4-1参照)				
ガスト影響係数	G _f	2.200		(表4-2参照)				
その地域における基準風速	V ₀	36.000	m/s	(*)				
補正係数	E = G _f ・E _r ²	2.710						
1/2□	k	0.600						
風速圧	q = 0.6E・V ₀ ²	2107.4	N/m ²					
【4】 支柱曲げモーメント								
回転面積(受圧面)	a = πD ² /4	2.630	m ²	基礎	支柱係数	支柱		
風全圧力	p = a・q	5.543	kN		0.333	1.846	kN	
曲げモーメント	M = p・h	2937.7	kN cm		0.333	978.27	kN cm	
【5】 支柱部材算定								
モノポール	→曲げ応力が大きいため→			ガワイヤー方式		1.3	2.8	5.3
支柱軸力		1.014	kN		kN	1.014	1.014	
支柱曲げモーメント	M	978.3	kN cm		kN cm	239.952	516.821	
支柱断面積	a	8.636	cm ²		cm ²	8.636	8.636	
支柱断面係数	z	17.904	cm ³		cm ³	17.904	17.904	
曲げ許容応力度	f _b	22	kN/cm ²		kN/cm ²	22	22	
圧縮許容応力度	f _c	22	kN/cm ²		kN/cm ²	22	22	
曲げ	σ _b = M/z	54.640				13.402	28.867	
圧縮	σ _c = N/a	0.117				0.117	0.117	
	σ _b /f _b	2.484				0.609	1.312	
	σ _c /f _c	0.005				0.005	0.005	
	Σ	2.489	>1(×)		1(OK) >	0.615	1.317	
【6】 基礎の設計								
コンクリート形状	B×L×d	0.680	0.680	0.680	m			
モーメント	M = p・d	3.769	kNm					
曲げ方向断面積	A = B・L	0.462	m ²					
コンクリート荷重	F _w = 20・B・L	9.248	kN					
コンクリート断面係数	Z = B・L ² /6	0.052	m ³					
	ΣN = F _w + N	10.262	kN					
	ΣN/A	22.192	kN/m ²					
	M/Z	71.924	kN/m ²					
	ΣN/A + M/Z	94.116	kN/m ²	< 100kN/m ² (短期地耐力) (OK)				
	ΣN/A - M/Z	-49.73						
【7】 アンカーボルトの設計								
		1.3の場合			2.8の場合			
支柱曲げモーメント	M	239.952	kN cm		516.821			
単位モーメント	Q	7.525	kN		3.494			
ベースプレート形状	φdb×d	29.000	1.000 cm					
アンカーボルト	number×M12	2	1.2 cm					
アンカーボルト埋込長	L'	30	cm					
曲げ荷重	t	3.999	kN		8.614			
曲げ応力	σ/A	5.092	kN/cm ²	< 22(OK)	10.967	kN/cm ²	< 22(OK)	
せん断応力	τ	14.372	kN/cm ²	< 22(OK)	6.673	kN/cm ²	< 22(OK)	

(*) V₀: その地域における基準風速とは、その地方における過去の台風の記録に基づく風害の程度その他風の性状に
 応じて30m/sから46m/sの範囲で定められる数値で、ここでは36m/sとした。

表3-1 使用コンクリート及びコンクリートの許容応力度 (N/cm²)

種 類	F C	長 期		短 期	
		圧 縮	せん断	圧 縮	せん断
普通コンクリート	1800	600	60	1200	90

表3-2 許容付着応力度 (N/cm²)

F C	丸 鋼				異 形 鉄 筋				形鋼, 鋼板	
	長 期		短 期		長 期		短 期		長 期	短 期
	上端筋	その他	上端筋	その他	上端筋	その他	上端筋	その他		
1800	72	108	108	162	120	180	180	270	36	54

表3-3 使用鉄筋及び鉄筋の許容応力度 (N/cm²)

種 別	長 期		短 期	
	引張及び圧縮	せん断補強	引張及び圧縮	せん断補強
SD295	20	20	30	30

表3-4 使用鋼材及び鋼材の許容応力度 (kN/cm²)

種 別	種 類	4 ≤ t ≤ 40	長 期					短 期	
			圧 縮	引 張	曲 げ	せん断	側 圧	接 触	長期応力に対する値の1.5倍
SM50, SM50Y			22	22	22	13	42	63	

表3-5 地盤の許容応力度

種 類	長 期	短 期	備 考
地盤の許容応力度	50 kN/m ²	100 kN/m ²	地質

表 3-6 使用鋼材の断面性能

呼び径	断面性能		断面積	単位重量	断面2次モーメント	断面2次半径	断面係数
	直径	厚さ					
80	89.1	3.2	8.636	6.779	79.761	3.039	17.904

ここに、断面積 $a = \pi(d_o^2 - d_i^2)/4$ [m²]、単位重量 $g = a \cdot \rho$ [m]、断面2次モーメント $I = \pi(d_o^4 - d_i^4)/64$ [m⁴]、断面2次半径 $i = (I/a)^{0.5}$ [m]、断面係数 $Z = I/\eta_0$ [m³]である。

表 4-1 地表面粗度区分

地表面粗度区分			I	II	III	IV
高さ	h	m	20.4	20.4	20.4	20.4
	Zb	m	5	5	5	10
	Zg	m	250	350	450	550
	α		0.1	0.15	0.2	0.27
	k		1.7	1.7	1.7	1.7
平均風速の鉛直分布係数	Er		1.323	1.110	0.916	0.698

ここに、 $E_r = 1.7(Z_b/Z_g)\alpha$ であり、 H が Z_b を超える場合は $E_r = 1.7(h/Z_g)\alpha$ となる。 E_r : 平均風速の鉛直分布係数とは、平均風速の高さ方向の分布を表すものとして、建築物の屋根の高さ及び周辺の市街地の状況に応じて定められる数値である。地表面粗度区分については平 12 建告第 1454 号に次のように規定されている。

I は都市計画区域外にあって、極めて平坦で障害物がないものとして特定行政庁が規則で定める区域となっている。
II は都市計画区域外にあって地表面粗度区分 I 以外の区域、又は都市計画区域内にあって地表面粗度区分が IV 以外の区域で、海岸線又は湖岸線から 500m 以内の区域、ただし建築物の高さが 13m 以下の場合又は海岸線若しくは湖岸線から 200m を超え、かつ、建築物の高さが 31m 以下の場合は除くとなっている。III は、I、II、又は IV 以外の区域である。IV は都市計画区域内にあって、都市化が極めて著しいとして特定行政庁が規則で定める区域となっている。

表 4-2 ガスト影響係数

						高さ
ガスト影響係数	Gf(一)	2	2.2	2.5	3.1	10m以下
ガスト影響係数	Gf(二)	比例こう配 ↓	比例こう配 ↓	比例こう配 ↓	比例こう配 ↓	10m～40m
ガスト影響係数	Gf(三)	1.8	2	2.1	2.3	40m以上

G_f : ガスト影響係数とは、突風等の風の影響の程度を表すものとして、建築物の屋根の高さに及び周辺の市街地の状況に応じて定められる数値である。

TX (送信データ), RX (受信データ)はそれぞれ送信用, 受信用として直列伝送でデータが運ばれる線である。今回は, 2文字 (1文字は8ビットで表せるので計16ビット) をシリアル通信制御基盤上のマイコン (PIC16F628) に送ることによって制御する。

また, RS-232Cではビット同期を得る方法として, 調歩同期方式を用いている。8ビットのデータを送信する時には, スタートビット (1ビット) とストップビット (1ビット) を付加するため, 最低10ビットを送信する必要がある。

図4にビットの伝送方式を, 図5にRS-232Cの信号波形を示す。

ここに, PIC (Peripheral Interface Controller) はコンピュータの周辺に接続されている周辺機器との接続部分を制御するために開発された「マイクロコントローラ」と呼ばれる領域のICであり, PIC16F628には, シリアル通信機能 (7ピン: RX, 8ピン: TX) がある。受信データ (RX) に2文字 (16ビット) 入力されると, RA, RBポートの1~3ピン, 10~13ピン, 15~18ピンの計11ポートから電圧が出力される。パソコンから送信する2文字とマイコン, 端子の関連性を表5に示す。1文字目がマイコンの10~18ピン, 端子では ~ に対応している。2文字目がマイコンの1~3ピン, 端子では ~ に対応している。なお, , はリレーである。

例えば, パソコンから「ab」という文字が送られた場合, 「a」→「01100001」, 「b」→「01100010」となり, , , , が-12Vと導通してリレーがONとなる。また, - が導通して電圧・周波数測定モードになる。パソコンから「cd」という文字が送られた場合, 「c」→「01100011」, 「d」→「01100100」となり, , , , が-12Vと導通してリレーがONとなる。また, - が導通して電流測定モードになる。

次に, 図3のシリアル通信制御基盤にある各機器についての概要を説明する。RS-232CインターフェイスICは, RS-232Cの信号電圧が-10V~+10Vであるため, PIC等で入出力ができるように0V~+5Vに変換するためのICである。RS-232Cの信号電圧レベルとPIC16F628の信号電圧レベルの関係を表6に示す。

トランジスタアレイ (TOSHIBA TD62003AP) はNPNトランジスタで構成された7回路のクランプダイオード付きダーリントトランジスタであり, 微小な入力電流で大電流を制御することができる半導体集積回路である。マイコンから出力される微小な

電流を増幅することによってリレー (ミニパワーリレー, マイクロリレー) を駆動している。

三端子レギュレータ (7805D) は安定化電源用のICで, 出力電圧を一定にする働きがある。7805Dによって, DC5Vに安定化した電源でRS-232CインターフェイスICならびにPICマイコンを駆動した。

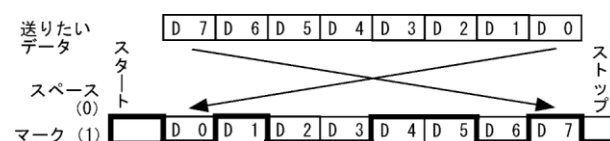


図4 ビットの伝送方式



図5 RS-232Cの信号波形

表5 パソコンから送信する2文字とマイコン, 端子の関連性

1文字目	マイコン	端子	備考
上位4ビット	8ビット	RA1	① 1.16[Ω]
	7ビット	RA0	② 2.5[Ω]
	6ビット	RA7	③ 6.7[Ω]
	5ビット	RA6	④ 9.6[Ω]
下位4ビット	4ビット	RB7	⑤ 27[Ω]
	3ビット	RB6	⑥ 42[Ω]
	2ビット	RB5	⑦ 94[Ω]
	1ビット	RB4	⑧ 170[Ω]
2文字目	マイコン	端子	備考
下位4ビット	3ビット	RA2	Hなら⑩, ⑬が導通 電流測定
			Lなら⑪, ⑬が導通 電圧, 周波数測定
	2ビット	RA3	⑩ 使用せず
	1ビット	RA4	⑨ 使用せず

* 2文字目の3ビットは1なら端子 , 0なら端子 に切り替わる。

表6 RS-232CとPIC16F628の信号電圧レベルの関係

	RS-232C	PIC16F628
ビット「1」	-15V~-5V	5V
ビット「0」	5V~15V	0V

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	抵抗 Ω]											
2	R =		170									
3	時間	電圧 [V]	電流 [A]	周波数 [Hz]								
4	2005/ 1/ 13 13: 21	12. 696	0. 042	23. 8859	0. 533232	1433. 154						
5	2005/ 1/ 13 13: 22	2. 363	0. 036	7. 8758001	0. 085068	472. 548	ファイル保存			停止		
6	2005/ 1/ 13 13: 30	6. 67	0. 046	16. 508801	0. 30682	990. 528						
7	2005/ 1/ 13 13: 31	12. 156	0. 038	28. 143801	0. 461928	1688. 628						
8	2005/ 1/ 13 13: 40	7. 6734	0. 052	13. 0159	0. 399017	780. 954						
9	2005/ 1/ 13 13: 44	11. 434	0. 042	34. 8741	0. 480228	2092. 446	抵抗値の設定			計測開始		
10	2005/ 1/ 13 13: 50	12. 4623	0. 012	16. 3137	0. 149548	978. 822						
11	2005/ 1/ 13 13: 52	9. 17	0. 07	9. 5973997	0. 6419	575. 844						
12												

図6 Visual Basic マクロ

発電機の出力電圧, 出力電流, 周波数の計測はパソコンとの接続を考慮して, RS-232Cインターフェイスを装備したデジタルマルチメータ (HIOKI 3238 デジタルハイテスタ) を用いた。電圧, 電流, 周波数を測定する個所はそれぞれ異なるため, マルチメータのプローブの接続個所を切り替える必要がある。そこで, マイクロリレー (OMRON G5V-1) を使用して, 接続個所の切り替えを行った。

図6にVisual Basic マクロを利用したのExcel シートへの測定結果の出力の例を示す。本制御計測システムの使用法の概要は以下の通りである。

(1) B2のセルに並列に接続したスライド抵抗器の合成抵抗 (発電機にかかる負荷に対応する) の値を入れる。

(2) 抵抗値の設定ボタンを押す (メッセージボックスに合成抵抗が表示される)。

以上の(1), (2)で抵抗値の設定が終わる。その後, スライド抵抗器に接続されたりレーが自動的に作動して, スライド抵抗器の合成抵抗は, B2のセルに入力した抵抗値に一番近い値に設定される。

(3) 計測開始ボタンを押す。

時間のセルには「月日時間分」が表示される。電圧のセルには, 図2のBC間の電圧, すなわち発電機の出力電圧が表示される。電流のセルには, 図2の直列に接続された分流機の両端であるAC間の電圧を分流器の抵抗0. 5m Ω で割った値, すなわち発電機の出力電流が表示される。発電機は低回転でも発電できる交流同期型であり, 出力は発電機内部の整流器で直流に変換されている。整流後の電圧波形は交流成分を含んでおり, その周波数は発電機の回転数に比例する。そこで, BC間の周波数を測定し, 周波数のセルに表示した。計測したデータは日付が変わる深夜0時に日付と抵抗値を含むファイル名で自動的に保存される。

風速は絶えず変動しているため, 様々な負荷に対して, 以上の(1)から(3)を繰り返して行うことで, 周速比と出力の関係を測定することができる。

5. おわりに

マイクロ風力発電機を屋上に移設するための基礎設計, 風力発電機の負荷制御ならびに出力・周波数のLANを用いた遠隔計測制御システムを構築した。今後, 停電時などの安全対策を施し, 風車ブレードの特性実験を遂行し, 出力50kW以下の小型あるいは1kW以下のマイクロ風力発電機に適した高性能ブレードの開発研究を行なっていく予定である。

参考文献

- (1) 風力発電ネットワーク, www.tronc.co.jp/hikakuhyou.html
- (2) 清水幸丸, 風力発電技術, パワー社(1999)

謝 辞

本研究で使用した風力発電機は平成9年に本校教育研究校内特別経費, テーマ名「風力・ソーラ複合エネルギー実験装置および電光掲示板」により設置されたものであり, 関係諸氏に対しまして, ここに記して感謝申し上げます。