

風力・ソーラー発電入門

本冊子は、２００１年度「ソーラーシステム」紙からの要請で
寄稿したものを加筆・再編集し、冊子化したものである。

２００８年５月

著者：長谷川義之

Copyright © Yoshiyuki Hasegawa

風力・ソーラー発電入門 Part-1

○ 風力・ソーラー発電の概要

過去、日本のクリーンエネルギー政策はソーラー発電にシフトしてきた。一方、その間先進各国は風力発電に力を注ぎ日本は遅れをとる事となった。しかし、この数年風力が見直され現在各地で大きなプロジェクトが進行しているのは周知のことである。

本冊子では、個人レベルで出来る風力とソーラーを使用したハイブリッド発電システムの作り方を紹介し風力発電人口のボトムアップにつながればと考える。

風力発電あるいは、ソーラー発電のみをお考えの方は、本冊子の該当する項目を参考にして頂ければ、概略的な事は理解できる内容となっている。

1. ハイブリッド発電

ここでは、風力発電機を家庭の屋根や庭に設置する事を前提にする。このため発電機の規模は数百ワット以下が限度と思われ、弱風地域においてもある程度安定した電力を得るため、風力とソーラーを組み合わせたハイブリッド発電システムの構築例を紹介する。

2. ハイブリッドシステム例

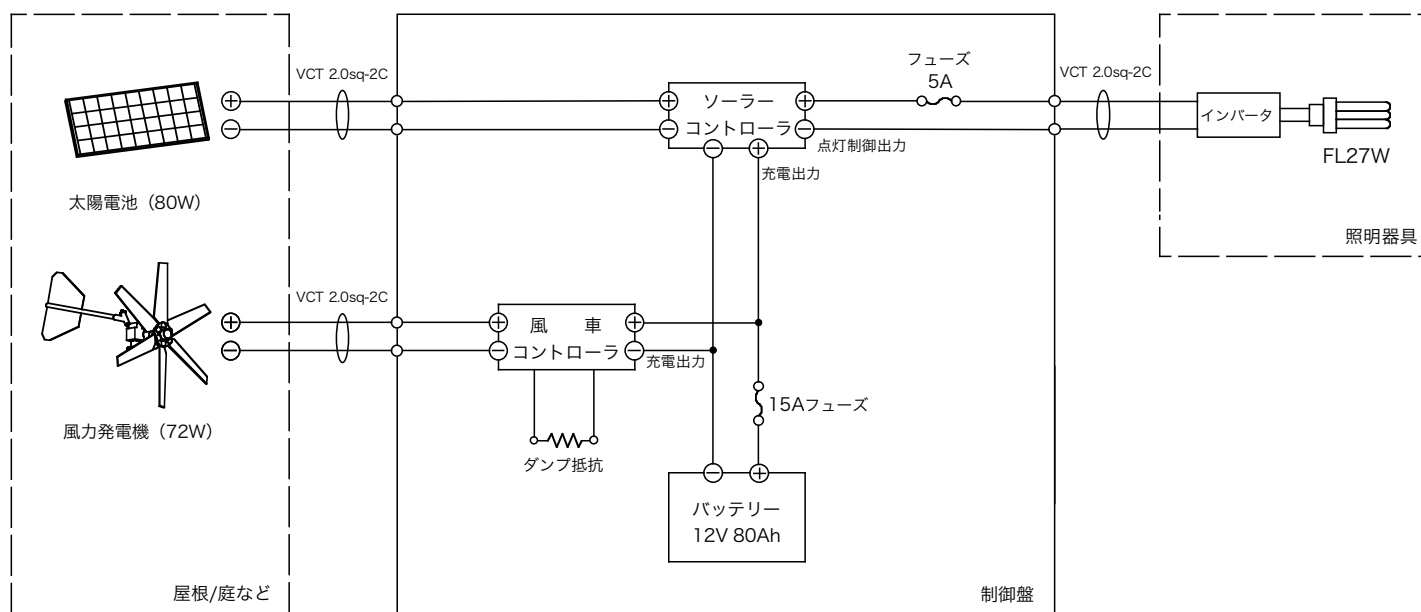


図1 ハイブリッド発電系統図

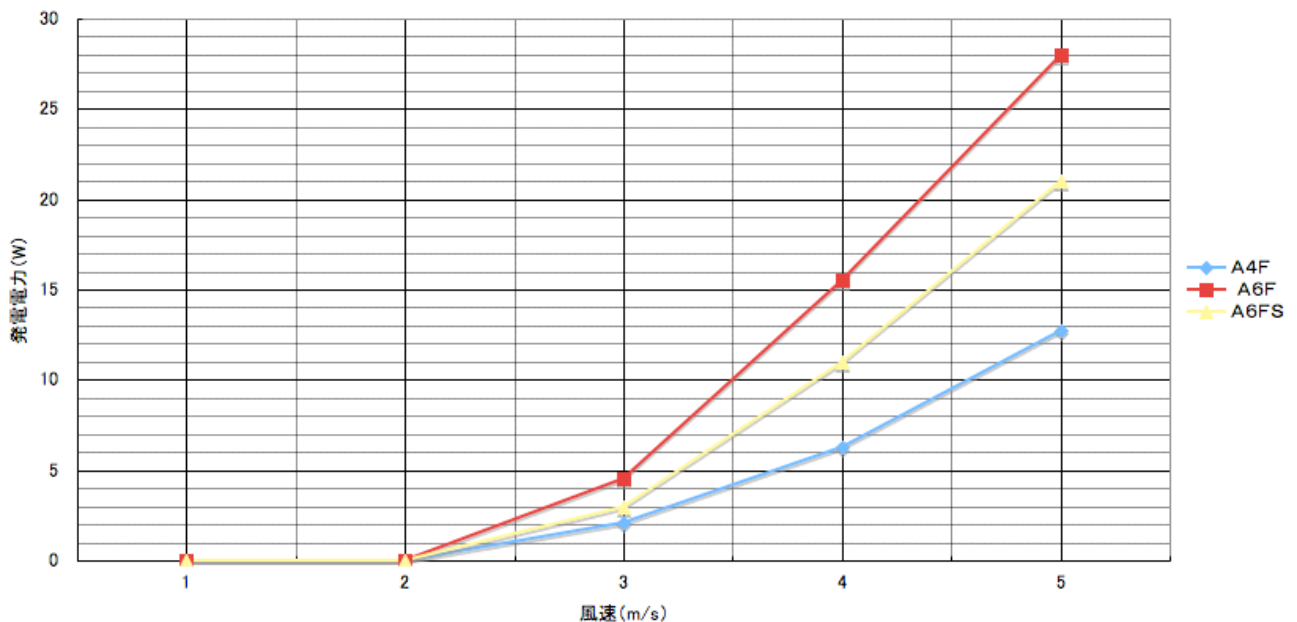
図1にハイブリッド発電の系統図を示す。これは、風車とソーラーで発電した電力を各コントローラを介しバッテリーへ充電しておき、夜間の照明に使用するシステムである。毎日27Wの蛍光灯を日没後4時間点灯する性能と5日間の不発電補償（バックアップ日数）を有する。写真1、2とグラフ1に風力発電機とソーラーの例を示す。ここでのポイントは、ソーラーコントローラと風車コントローラである、各コントローラは、バッテリーの電圧を検知してバッテリーに最適となる様パルス制御（PWM）により電流をコントロールしながら充電してゆく、これは主にバッテリーに過充電しない様にするためである。（バッテリー保護）



写真 1、A4F (72W) 風車



写真 2、80Wソーラーパネル



グラフ 1、風車 風速 vs 発電電力 (1~5m/s)

この時、ソーラーコントローラはパネルからの電力をON/OFFのスイッチングにより充電電流をコントロールする。一方風車コントローラは、バッテリーに充電されない電流をダンプ抵抗に流し風車から見て常に負荷がかかる様にする。これは、バッテリーが満充電でかつ強風の場合でも風車を空回りさせないためで、風車の回転機構を高速回転から保護し長持ちさせるための電子回路である。こうしてバッテリーに充電された電力は、ソーラーコントローラの点灯出力からインバータにより蛍光灯を点灯させる。ソーラーコントローラは、パネルの出力電圧を検知し昼と夜の判断をして暗くなると設定した時間だけ点灯出力をONにする。

この他ソーラーコントローラは、バッテリー電圧が低下した場合、点灯出力をOFFにする過放電防止機能も有している。ここでは、照明を負荷として考えているが、DC12Vの機器やAC100V出力のインバータを接続して使用することも出来る。この場合負荷消費電力と発電電力のバランスを考える事は大切である。

3. 必要発電電力の算定

システムの構築に当たり、まず考えなくてはならないのは、何ワットの負荷を何時間使用した
いかである。（以下に示す電力量は、1日当たりのものである。）

この例では、27Wの高効率蛍光灯を4時間点灯させる。インバータの効率を80%として消費電力量は、

$$27\text{W} \times 4\text{h} / 0.8 = 135\text{Wh}$$

さらに安全率として負荷係数1.0～2.0を掛ける、ここでは1.5として総消費電力は、

$$135\text{Wh} \times 1.5 = 202.5\text{Wh}$$

次に、発電電力の利用率(%)を考える。仮に利用率100%とすると、その日に発電した電力をその日に使い切る事を意味する。もし不日照や無風が続いた場合や断続的に来た時バッテリーへ十分な電力を充電出来なくなる可能性がある。バッテリーの寿命を延ばす事も考えると理想的には、1日1回バッテリーが満充電になる様にすべきである。ここでは、利用率50%とし、残りの50%は、バッテリー回復のための貯金分とする。

1日当たり必要な発電量は、

$$202.5\text{Wh} / 0.5 = 405\text{Wh}$$

この電力を風力発電とソーラー発電に振り分ければ良い事になる。

4. 発電電力の算定

風車・ソーラー発電電力を予測するのは難しい問題である。とくに風力は地域性が大きく予測しにくい、そのため、様々な計算式が使用されるがここでは、簡便法として経験的な計算方法を紹介する。これは、全国の内陸地において大体当てはまる方法であるが、どの風車にも当てはまるものではない事を断っておく。

4.1 風車の発電電力

まず、平均風速を3.5m/sと想定する。A4F型風車を使用する事とし、グラフ1より3.5m/sの時では4Wの出力が予想される。

24時間稼働とし安全率として環境係数0.7を掛けて1日の風車発電電力量は、

$$4\text{W} \times 24\text{h} \times 0.7 = 67\text{Wh}$$

4.2 ソーラー発電電力

ソーラーの発電電力量は、全必要電力量405Whから風車発電電力量を差し引き、

$$405\text{Wh} - 67\text{Wh} = 338\text{Wh}$$

平均日照時間を3.5時間と想定して、ソーラーパネルの発電電力は、

(注：平均日照時間は、地域により3.0～3.5時間に設定)

$$338\text{Wh} / 3.5\text{h} = 96\text{W}$$

注：日照は日の出から日没までであり実際のソーラーの発電はグラフ2のような曲線を示し

最大発電電力は夏期・南中時でもパネル定格値の80%程度である。

ここで言う平均日照時間とは1日の日射をパネルが100%発電する時間に換算した値である

より、80Wのパネルを使用する事とする。実際の発電量は、

$$80\text{W} \times 3.5\text{h} = 280\text{Wh}$$

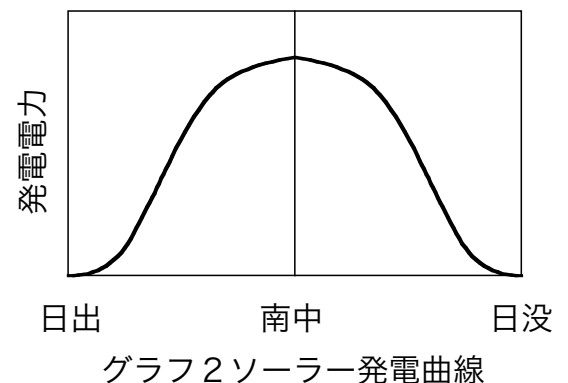
4.3 風車・ソーラーの合計発電量は、

$$67\text{Wh} + 280\text{Wh} = 347\text{Wh}$$

実際の利用率は、

$$202.5\text{Wh} / 347\text{Wh} = 58\%$$

(利用率が60%以下であれば、可とする)



5. バッテリーの容量の算定

バッテリーのバックアップ日数を5日とするとバッテリーの必要容量は、

$$5\text{日} \times 202.5\text{Wh} / 12\text{V} = 84.4\text{Ah}$$

より80Ahのバッテリーを使用するものとする。実際のバックアップ日数は、

$$80\text{Ah} \times 12\text{V} / 202.5\text{Wh} = 4.75\text{日}$$

以上で各機器の容量の算定が完了した。

Part-1では、個人レベルでの風力・ソーラー発電について述べたが、ここに記した計算方法は、風車・ソーラーによる独立電源の街路灯だとか非常用電源装置とか様々な用途に応用出来ると考える。又、発電容量は、かなり余裕を持った設計になっている、負荷係数だとか環境係数の安全率は、各自の最適と思われる値を使用してほしい。

風力・ソーラー発電入門 Part-2

○ 風力発電機の概要

Part-1では、風力・ソーラーハイブリッドシステムの設計に関する全体像を述べたがPart-2では、風車について少し突っ込んだ内容を記す、しかし風車は大変奥深い機械であり本節では、ほんの入口についてしか書けない、興味のある方は、文末に記す参考図書を参照されたい。

1. 風車の分類

風車は、オランダ風車やプロペラ風車のような水平軸形とサボニウス風車やダリウス風車のような垂直軸形とに大別される。近年、垂直軸形も発電風車として利用されるようになったが、ここでは、プロペラ風車などの水平軸形に的を絞って話を進める。一般的に水平軸形風車の回転原理は、飛行機の翼やプロペラの推進原理の変形として説明される。風車のエネルギー源は、風である常時風の良く吹く所ほど取り出せるエネルギーは、大きくなる、小型風車と言えどもやはり風の良く吹く場所に設置すべき事は重要である。

2. 少翼風車と多翼風車

風車の羽根は、1枚のものから18枚さらに24枚の多翼形まで種類は多い、羽根は風を受けて回転するが、一方で回転方向で空気の抵抗を受ける、多翼風車では羽根の枚数が多い分受ける抵抗も大きくなる、空気の抵抗は、速度の3乗に比例して増加し、風車の回転を押し止めるように働く、又、空気の乱流によっても羽根は失速する、このことから多翼風車は、高速回転出来ない、反対に最も高速回転するのは、1枚羽根の風車である。一方風車の回転力は羽根の受風面積に比例するので、多翼風車は弱風でも良く回転し回転トルクも大きい、少翼風車は弱風では、回転しにくいがある程度の風速があれば高速回転する。一般的に発電機を高速回転させる必要のある発電風車には少翼形が適しており高トルクが必要で高速回転の必要に無い揚水風車（ウインドミル）には、多翼風車が適している、しかし、近年少翼風車でもブレードや発電機の改良により弱風でも良く回り発電出来る風車が開発されている。

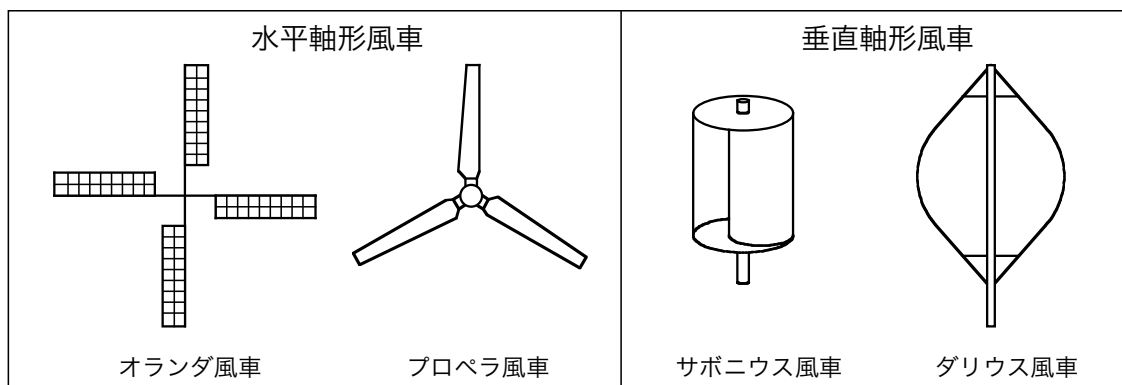


図1 風車の分類

○ 各種風車の例



A2 (18W)



垂直型 (12W)



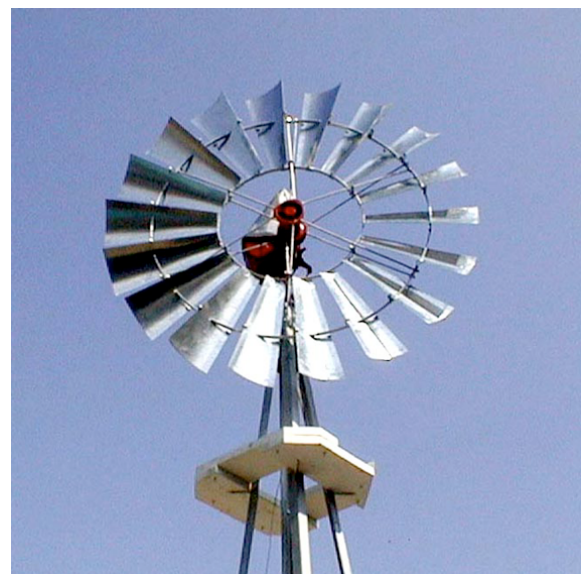
A6F (180W)



PS3-12V (300W)



1枚羽根風車 (7.5kW) 参考



揚水風車 (ウインドミル) 1.8m径

3. 小型風車の形状

中・大型風車で海岸線や強風地帯に設置されるのを前提にしている風車の殆どが1～3枚羽根であるが、本連載で対象としている小型でかつ弱風地帯に設置される風車には、どのような羽根が適しているのだろうか。まず、発電を目的としているのでプロペラ形で少翼形が良いと言えるが弱風でも回って欲しいので羽根の枚数は3～6枚が適していると考え。羽根の形態は空力学的に優れたフォームであると共にある程度の面積があった方が風のエネルギーをしっかりと捉えることが出来る、経験的に、6枚羽根のものは弱風でも良く回る。

4. 風車の強風対策

日本の内陸地域は、普段は低風であるが、一端台風が通過すれば 20 m/s 以上の強風に見舞われる、風車も強風対策された機構をもつものを選定するのが賢明である、しかし、自然の力は、強大でありいくら強風保護対策をしても絶対とは言えない、どこかで妥協点を考えるしかない、耐風速は、本土では 60 m/s が、諸島部では 70 m/s の風速が目安となるが、このような風速を前提として対策しても飛来物が当たったりして壊れる時は壊れるのである、被害を最小限に止めるような全体機構を考える事が必要であると考え。風車を強風から保護するには、飛来物の衝突を別として許容値以上の高回転をさせないようにする事である、具体的には、風車の強風保護機構は、以下に述べるようなものがある。

4.1 ファーリング制御

ファーリングとは、折り畳むという意味である、強風時には、図-2のように風車の羽根が風向に対して回転軸のずれによりファーリングし風を正面から受けないようにし回転を押さえるように制御する機構である、この機構は、単純であり空力・機械的であるので信頼性が高いのが特長である、この機構をもつ風車は小・中型風車に多くみられる。

4.2 ピッチ制御

ピッチ角とは、羽根のひねり角の事である、強風時には羽根の角度を風と平行にして風を通過させ回転を制御する、これをフェザーリングと言う、大型風車の殆どがこの方式を採用しているが、小型風車にも羽根の遠心力を利用したり電気・電子的に制御するものなど様々なものが見られるようになった、この方式は制御方法としては、スマートであるが機構がやや複雑になるのが欠点である。

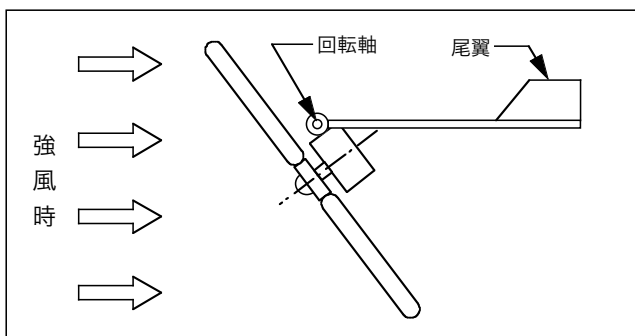


図2 ファーリング制御

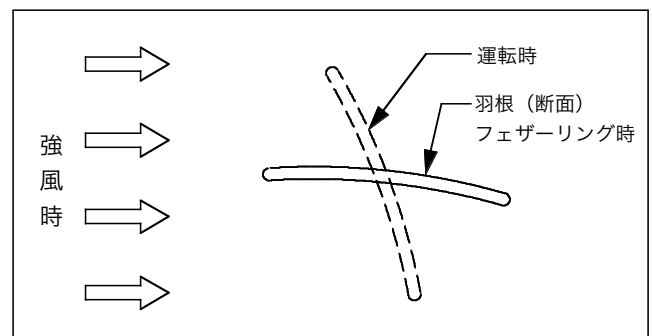


図3 ピッチ制御

5. 風車の効率

風車が風から取り出す事の出来るエネルギーは、羽根の面積に比例（羽根の直径の2乗に比例）し風速の3乗に比例するが、最大で59.3%であるこれをランチェスター・ベッツ限界（係数）と言う、実際には、これに空力的・機械的・電氣的な損失が加わり風車の発電効率は30～50%である。

6. 小型風車の経済性

売電を目的とする様な大型風車では、コストと消却の試算は比較的容易であり算定方法も確立されている、しかし、小型風車の経済性評価は曖昧な部分が多くその確立はこれからにかかっていると言える。曖昧さの主たる部分は、発電した電力を効率的に何に使用するかが明確でない事であると思う。小型風車の発電電力は、その設置条件から自ずと不安定で、微風地帯では発電電力も少ない場合が考えられる、この様な場合はソーラーとのハイブリッド発電が有効であろう。ただ漠然と発電するだけでは実質的な意味が無い。発電した電力を何に何時間使用するか、具体的な目的を持ってそれに見合った発電システムを構築して行くのが重要であり、その積み重ねにより小型風車の存在価値がより明らかになって行くと考える。

7. バッテリーの性能

本冊子で前提としている、風力・ソーラーハイブリッドシステムは、その発電電力をバッテリーに蓄電して必要な時に電力を取り出して使用するシステムである。ここで重要となるのがバッテリーの性能である。一般に良く使用されるバッテリーとして自動車用バッテリーがあるがこれはフロート用でありエンジンの始動時以外は常に満充電状態にある。フロート用のバッテリーは、この様な用途では長持ちする。一方本発電システムでは、充電出来る時に充電しておき、充電とは無関係に放電する。この様な使用をサイクル用途と言い、満充電とある程度の放電を繰り返すわけである。自動車用バッテリーをサイクル用途に使用した場合その寿命は著しく短くなる。この様な用途には、初期投資は多くなるがサイクル用バッテリーを使うべきである。これによりシステムのコストパフォーマンスと信頼性を格段に高いものとする事が出来る。

○ 参考図書

さわやかエネルギー風車入門

牛山泉 著 三省堂

小型風車ハンドブック

牛山泉・三野正洋 共著 パワー社

WIND POWER FOR HOME & BUSINESS

PAUL GIPE 著 CHELSEA GREEN PUB.

○ 風車用語

スタートアップ風速：風車が回転を始める風速

カットイン風速：風車が発電を始める風速

定格風速：風車が定格電力を
出力する風速

ファールリング風速：風車がファールリングを
開始する風速

フェザーリング風速：風車がフェザーリングを
開始する風速

風力・ソーラー発電入門 Part-3

○ 風力・ソーラー発電装置の設置事例

Part-3では、小型風車とソーラーのハイブリッド発電装置を実際に設置し、発電電力を測定しシステムの検証を行った結果と風車の発電量予測の方法について記す。

1. 装置の組み立て

風車とソーラーは、弊社屋上（3階建）へ屋根馬を作り設置した。ここから3Fの社内へケーブルを引き込みコントローラ類を組み込んだ制御盤へ繋ぎ込んだ。また発電電力を測定するための直流電力積算計を系統図の位置へ風車とソーラー用として接続した。風車用は、ダンブ抵抗の影響を受けずバッテリーに充電された電力を測定するためコントローラの後ろに入れている。組み立ては、盤への接続も含め1時間程度で終了した。組み立て過程と出来上がりは、写真を参考にして頂きたい。

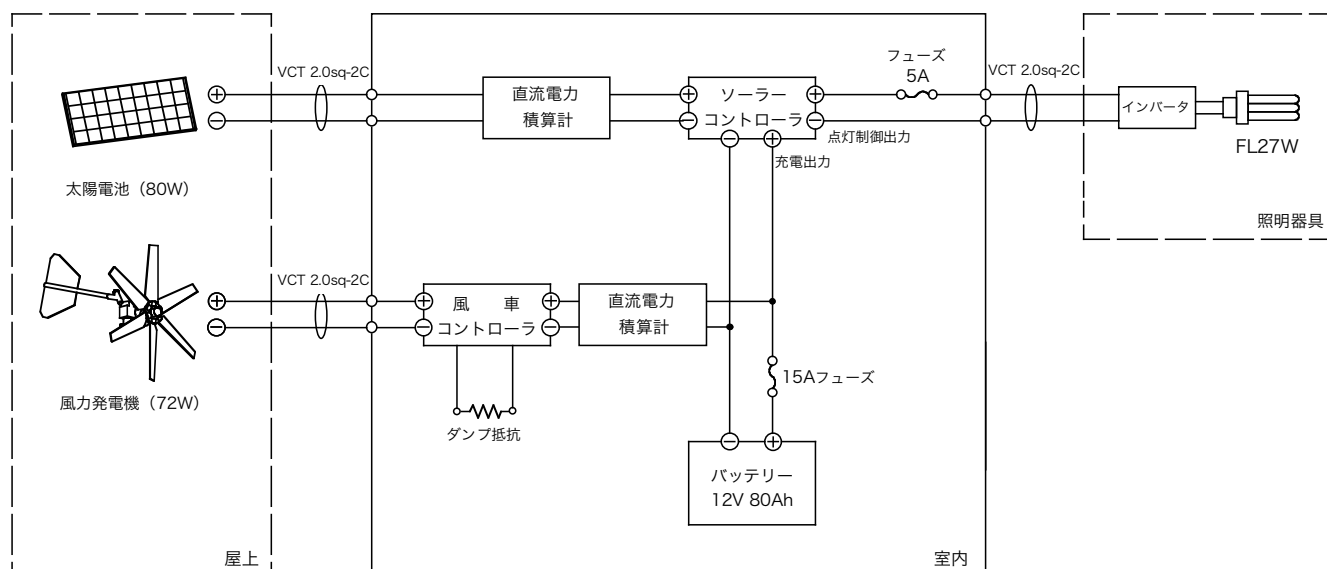


図1 ハイブリッド発電系統図（直流電力積算計付き）

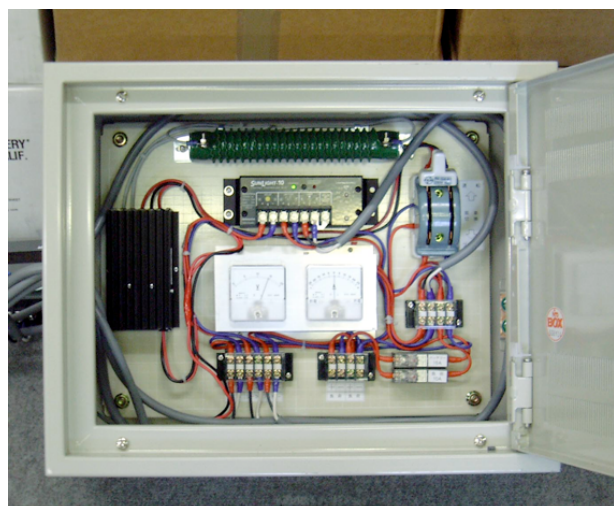


写真1 制御盤



写真2 バッテリー・直流電力積算計

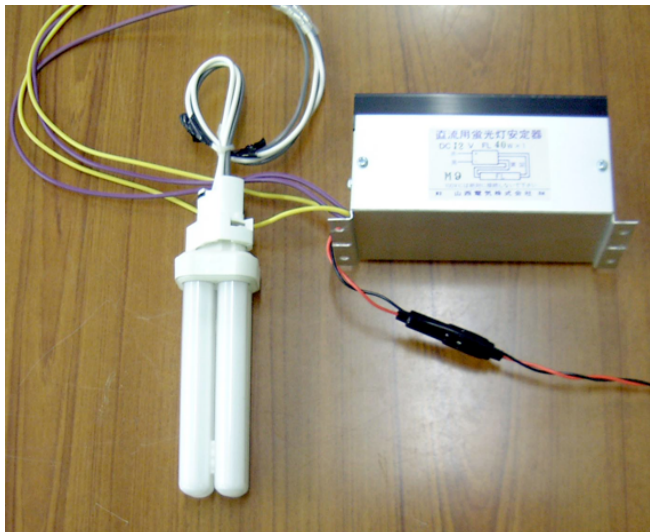


写真3 照明器具

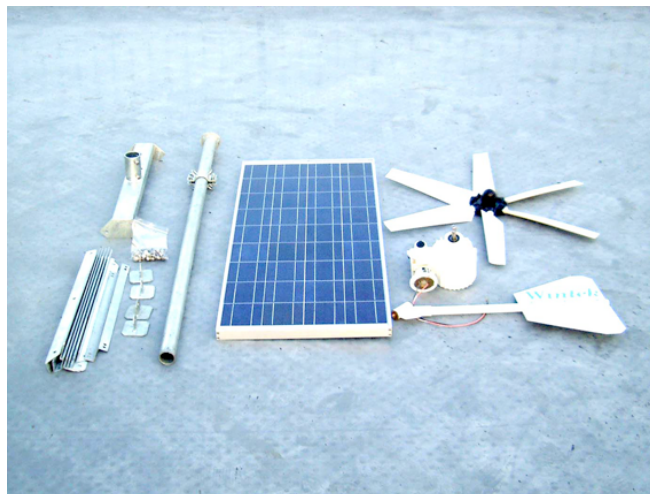


写真4 ポール組み立て前



写真5 ポール脚部



写真6 ポールステー部



写真7 完成

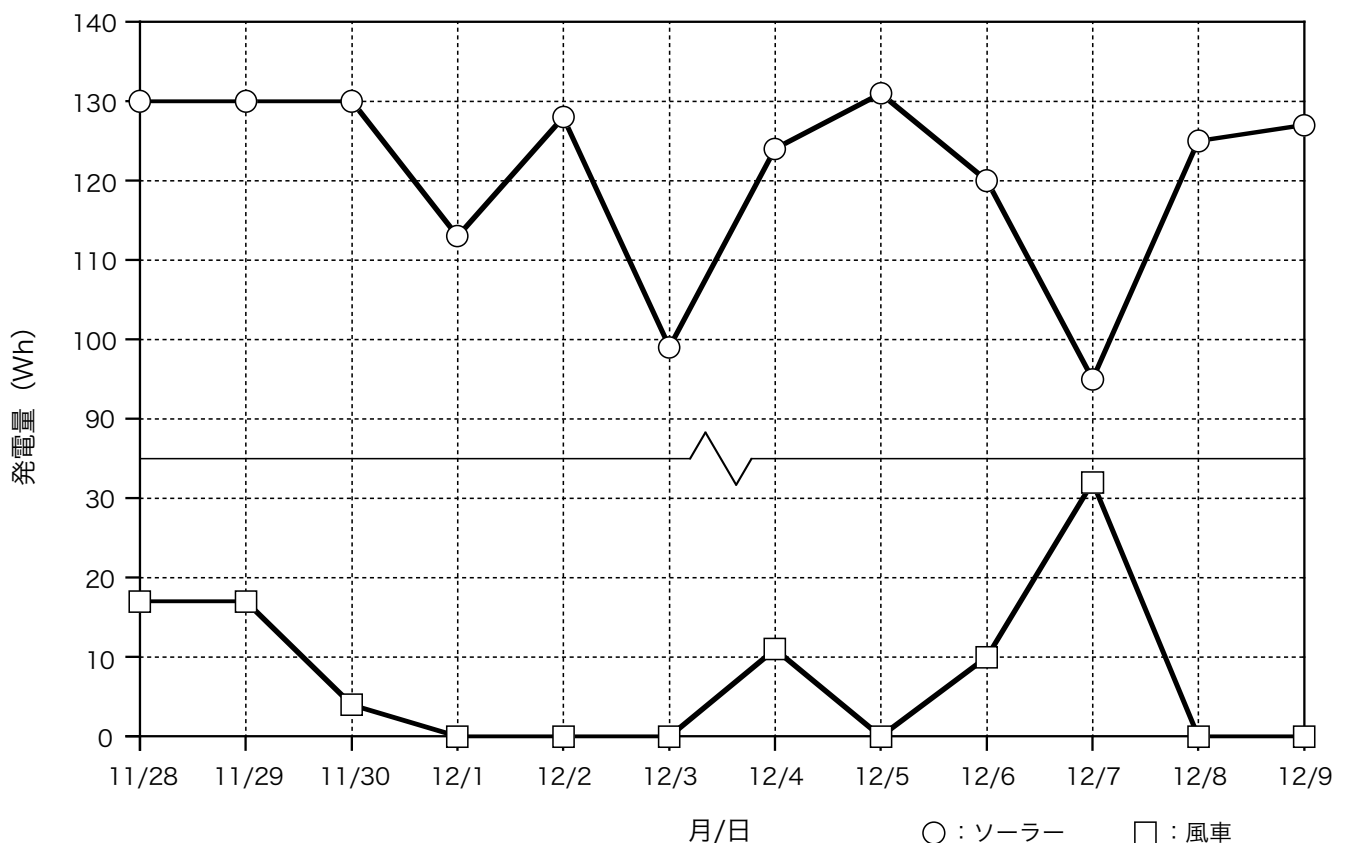
2. 測定結果

測定したのは、11月28日から12月9日の2週間と短い期間であるが、大体の傾向は、掴む事が出来た。負荷は、 $27\text{W} \times 4\text{h} = 108\text{Wh}$ であるが実際には、インバータのロスとして十数Wが加わり120～130Wh程度であると思われる（今回は、予算の都合で負荷側の電力計は省略した）。バッテリーは、ほぼ満充電の状態から使用を開始した。

グラフ1が風車とソーラーの発電電力の推移である。ソーラーは、天候によりややばらつきがあるもののほぼ消費した電力をバッテリーへ充電している様である。値の低い日は、曇りである、ソーラーの設計発電量： $80\text{W} \times 3.5\text{h} = 280\text{Wh}$ の3分の1程度（消費された電力量に等しい）充電されておりシステムとしては安定して動作していると思われる。

一方、風車が充電に寄与しているのは風の強い日で32W程度であった。弊社は、弱風地域の埼玉県さいたま市に所在しているが測定した期間では、一週間に1日程度風が吹きあとは無風の日が多かったこれは、測定結果からも推察される。しかし、強風の日でも風車が充電する値が、かなり低かったのは以外であった。本システムは、ソーラーを余裕をもって設計してあるので発電は、多くをソーラーに依存しているのが解った。

また、風の強い日は、風車の発電電圧が高くなり相対的にソーラーからの充電が低い値となる事も解った。システムは、一応設計値を満たしているのも確認が出来たが、データを見るともっと点灯時間を長く出来る可能性もあった。



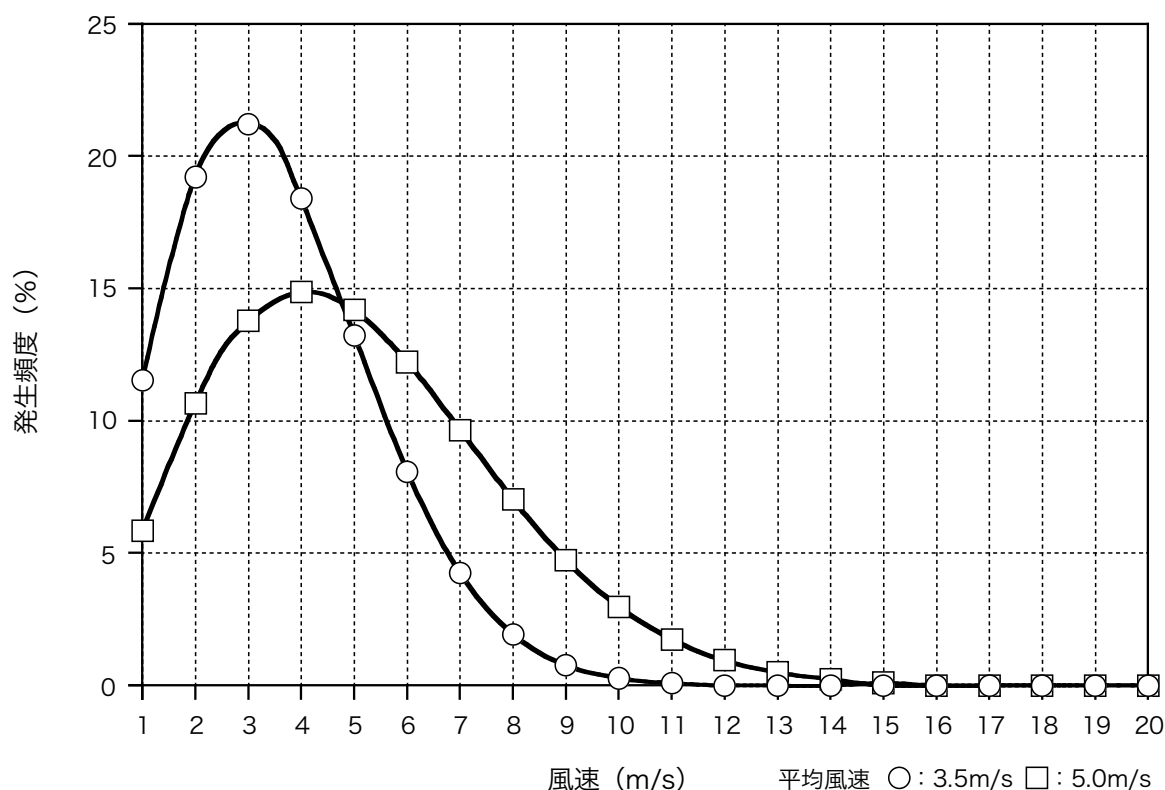
グラフ1 ソーラー・風車発電量推移

3. 風車の発電量予測

Part-1では、風車発電量の簡便な計算法を紹介したが、もっと大きな風車を単体で使用する場合など正確に発電量を予測したい場合がある。現在、多くの予測法があるが確率分布則によるものが主流となっている。これは実際に風況を調査し平均風速から発電量を予測する方法である。代表的なものにレイレ分布とワイブル分布があるが、ワイブルの方が新しく予測精度も良いとされている。グラフ2にワイブル分布の例を示す。現在弊社では、米国の風車メーカーであるBWC社のワイブル分布則によるシミュレーションソフトを使用しており重宝している、弊社のホームページからダウンロードできるので、試してみたい。このソフトでの計算結果を次ページに示す。計算に必要な値は、表1の入力条件と風車の風速1～20m/sでの発電ワット値である。なお、ソフトはエクセル上で動作する。

4. 風況データ

シミュレーションをするには、その地点での風況データ（主に平均風速）を入手しなければならない。実際に調査するのが理想であるが、時間と金銭的になかなか難しい。現在インターネット上で閲覧可能なデータに、NEDOの全国風況マップがあるが今のものは、平均風速4m/s未満は、一様で解らない。＜<http://www2.infoc.nedo.go.jp/fukyo/fuukyou.html>＞かわりに弊社では、（財）気象業務支援センター＜<http://www.jmbasc.or.jp/>＞から刊行されている、気象庁観測平年値（1971-2000）第4版、CD-ROMを使用している。これには、アメダス地点での平均風速が載っているので、風況を知りたい地点に比較的近い地点での風速を知ることができる。また、日照時間のデータも載っているのでソーラー発電の参考にもなる。



グラフ2 ワイブル分布

風力発電機パフォーマンス・モデル
ワイブル分布則による風速シミュレーション
_XCLWCAD0 Version 2.3J2a

顧客名: 殿
設置場所: 内陸
参照データ: 3.0 m/s(推定)
計測日付:

表1. 入力条件計算結果(担当)

平均風速(m/s)=	3.0	風車平均風速 =	3.00
地域風況係数K=	2.0	大気比密度 Da=	1.00
海拔標高 (m)=	50.0	平均出力 (W)=	3.12
地表層流率 Tf=	0.85	日発電量 (Wh)=	74.94
風速観測高(m)=	4.0	月発電量(kWh)=	2.28
タワー高さ(m)=	4.0	年発電量(kWh)=	27.37
計画稼働率 Af=	100.0%	時間稼働率 Ot=	57.6%
失効保険率 Df=	20.0%	設備利用率 Cf=	4.0%

(備考)
K=2.0~4.0: 内陸2、島3、
大陸沿岸2.5、強風島4。
Tf=0.8~0.95:市街0.8、
郊外0.85、灌木0.9。
Df=0~40%:系統連系5%、
充電20%、通信25~40%

表2. ワイブル確率からの期待出力現地データ (高さ10 m)

風速 V(m/s)	出力 Q(W)	頻度 P(%)	期待Q*P(W)	頻度p(%)	期待Q*p(W)
1	0.0	16.12%	0.00		
2	0.0	24.76%	0.00		
3	1.8	23.92%	0.42		
4	5.3	17.22%	0.92		
5	10.7	9.75%	1.05		
6	18.6	4.44%	0.83		
7	26.2	1.65%	0.43		
8	35.5	0.50%	0.18		
9	44.4	0.13%	0.06		
10	53.7	0.03%	0.01		
11	62.6	0.00%	0.00		
12	70.2	0.00%	0.00		
13	77.8	0.00%	0.00		
14	84.6	0.00%	0.00		
15	90.5	0.00%	0.00		
16	95.6	0.00%	0.00		
17	100.7	0.00%	0.00		
18	104.9	0.00%	0.00		
19	108.3	0.00%	0.00		
20	112.5	0.00%	0.00		

トータル頻度=	98.52%	0.00%
計算上の平均風速(m/s)=	3.03	
期待平均出力:MPO (W)=	3.12	0.00
平均日間発電量:DEO (Wh)=	74.94	0.00
推定年間発電量:AEO(kWh)=	27.37	0.00