

太陽・風力複合エネルギー利用システムの運転結果と特性

山根彌生*・真鍋 惇*

Operation and Performance Characteristics of a Solar and Wind Hybrid Energy Conversion System

Yayoi YAMANE, Atsushi MANABE

Abstract

A solar and wind hybrid energy conversion system was assembled with solar cell panels of rated output $35\text{ W} \times 2$, a small-scale wind driven generator of rated output 200W, storage batteries of $12\text{V} \times 400\text{AH}$ and fluorescent lamps installed in a corridor of the college and controlled automatically by magnetic switch, voltage sensor and timer.

This system was operated during the period Apr.1983 to Mar.1988 measuring the solar and wind energy density, generated electric energy, service energy and excess energy to dummy load.

The mean efficiencies of electric generations from the solar energy and wind energy were 8.3% and 15.0%, respectively.

Daily and monthly variations of the solar and wind energy and utilization factor of lighting apparatus were examined.

From these, some problems were discussed.

The results of simulation experiments to determine the optimum value of service power and storage capacity as a function of utilization factor of electric apparatus were shown.

1. まえがき

我々は、自然エネルギーの1つである風エネルギーを資源量として特性を計測し評価する方法について研究してきた。^{1) 2) 3)} 風エネルギー特性を求め、さらにその風エネルギー資源量の平均値と変動の大きさを知り、宇部小野田市域の資源量の分布を調べ資源評価を行ってきた。

風速は季節により変動し、冬から春季に風速強く、夏から秋にかけて弱い傾向が見られる。したがって、風速の弱い季節の風エネルギー利用システム改善のため、その補完システムとして太陽エネルギーの利用を考え、太

陽電池を風車設置場所と同じ屋上に設置し、1983年4月より計測を開始した。以来計測は休みなく続けられ、1983年4月より1988年3月までの5ヶ年のデータが得られたので、このシステムの運転結果とその特性を分析した結果を報告する。又このシステムに対する消費電力量とバッテリー容量の最適値を求め、又補完の効果を検討するためにシミュレーションを行った結果も合わせて報告する。

2. 実験設備

2.1 太陽エネルギー利用システム

風エネルギー補完システムとして、太陽電池を屋上に設置し、また全天日射計を2台、1台は水平に取り付け、もう1つは太陽電池パネル設置面上にパネルに並行に取り付けた。

*宇部工業高等専門学校機械工学科

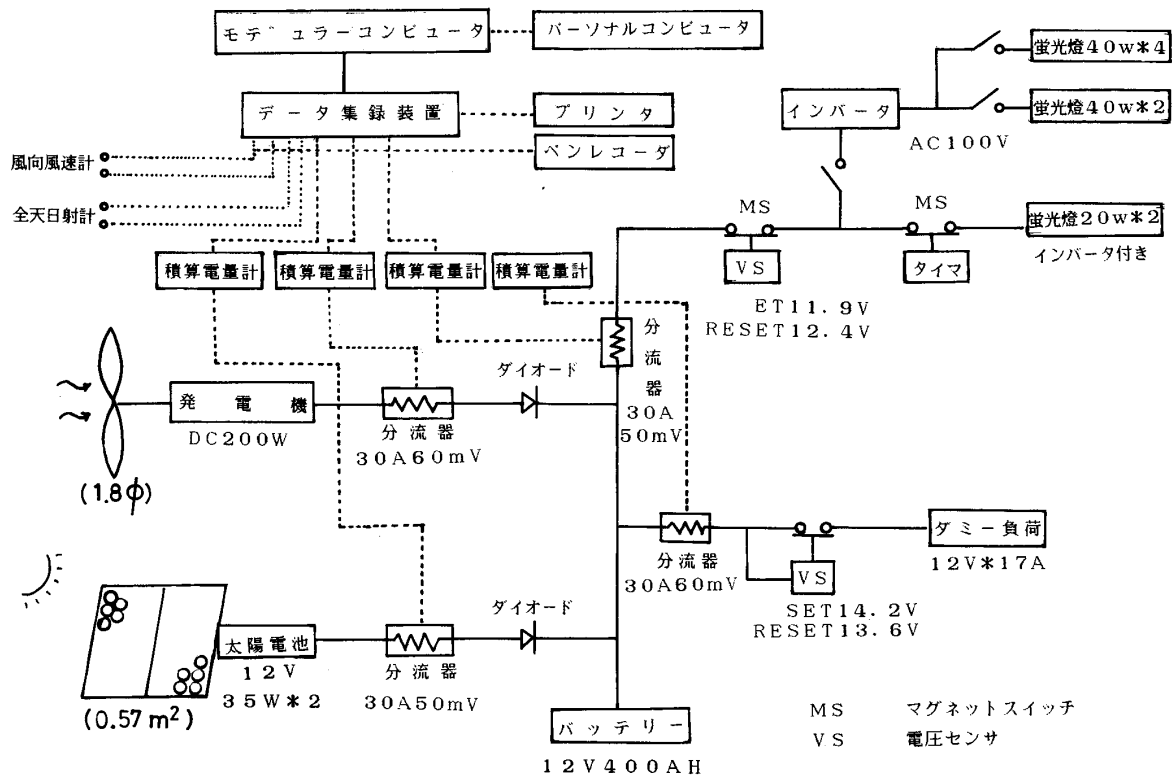


図1 システムのブロック図

太陽電池は、12V用直径4インチ36素子直列接続、最大出力35W変換効率12.4%のものを2台並列に接続し南向きに設置し、パネル面傾斜角を変化することが出来るように取付台をスライド式に設計している。

日射計はネオ日射計MS-42型で、日射データは瞬時値と積算値を30分毎に集録した。発電エネルギーは、バッテリー(12V、400AH)を介して利用機器に供給される。システムのブロック図を風力エネルギー利用システムとあわせ、図1に示す。風力エネルギー利用システムについてはすでに報告した¹⁾通りである。

2.2 データ集録システム

各種のデータは1分毎に計測し、30分毎に平均値又は積算値をプリントアウトするとともに、磁気テープに記録している。(テープ一本で約35日)

風力エネルギー、太陽エネルギーは、風速、日射量から1分毎にエネルギーを計算し、30分の積算値を求める。また太陽エネルギーは、日射計からの出力電圧を積分回路を通して求めた値もあわせて記録している。

集録が困難なのはむしろ変動の激しい発電電力量であるが、我々は積算電量計とその記録コンバータを使用している。前者は6桁のデジタルカウンターがついてい

るが、そのパルス出力端子を後者に接続すると、1段が0.45Vで10段で1山をなすステップ関数状の出力が得られる。コンピュータは、この山数、段数を判定して電力量を算出し記録する。利用電力量、タミー電力量も同様に計測している。A-D変換をかねて、24チャンネルの多点温度計(YODAC3874)を使用し、そのHP-IB出力をモデューラコンピュータ(YHP9915A)に与える。このコンピュータには磁気テープでプログラムを与えてあり、集録されたデータは磁気テープとして受取って、別のパーソナルコンピュータ(HP85またはNEC9800シリーズ)で処理する。

3. 利用システムの運転結果と特性

太陽エネルギー利用システム運転日数は電源の停電のための停止のほかは毎日であり、1983年4月から1988年3月の5ヶ年間1768日、年平均354日である。

風エネルギーシステムは1984年7月以降風力発電機の故障のため発電を中止したので、実際運転日数は1983年度1年間のみとなる。運転日数は254日で風力発電機稼働率は69%、その間の発電電力量は88.2KWH、日平均347WH、発電効率は12.7%であった。

1984年2月以降は風力発電の実測データにかえて、風

速のデータと機械効率より計算した発電電力量を使用する。

先に、傾斜面（太陽電池面）に入射する傾斜面全天日射量の実測値がない場合に、水平面の全天日射量（測定値）から、その傾斜面日射量を計算する方法について述べる。

3.1 傾斜面全天日射量の計算方法

太陽エネルギーを太陽電池に入力して使用する場合、太陽電池パネル面に入射する傾斜面の全天日射量を知る必要がある。傾斜面日射量を近似的に計算する方法として、散乱光、直達光を考慮し、次式を用いて水平面全天日射量の値より傾斜面日射量Pを求めた。^{4) 5) 6)}

$$P = (1-R) \cdot S \cdot (\cos \beta + \sin \beta \cdot \cos \psi \cdot \tan \zeta) + R \cdot S \cdot (1 + \cos \beta) / 2 + 0.1 \cdot S \cdot (1 - \cos \beta) / 2$$

- S ……水平面全天日射量
- R ……散乱光比
- β ……傾斜角（傾斜面方位は南とする。）
- ψ ……太陽方位角
- ζ ……太陽天頂角

Rは文献^{7) 8) 9) 10)}の散乱日射量と直達日射量の値より求めた。

30分毎太陽の方位角と天頂角を考慮し、水平面全天日射量より傾斜面日射量を求め、1日について積算することにより、任意の傾斜角 β における傾斜面日射量の日総量が求められる。1985年4月から1988年3月の3ヶ年について、太陽電池パネルに並行に全天日射計を設置し、傾斜面日射量の実測値を30分毎の積算値としてデータ収集している。そこで、パネル傾斜角に対する傾斜面日射量推定値を先の式により計算し実測値と比較したところ実測値に比し各月一様に低めに算出され、平均して約85%の値となった。したがって各月について3ヶ年平均した換算率をかけることにより計算した推定値と実測値を3ヶ年についてプロットすると、図2の様になった。実測値とのずれは最大で6.8%であるが、それ以外は5%内におさまり、ずれの平均値は2.0%であった。したがってかなりよい推定値であると考えられる。そこで以下傾斜面日射量実測値のない場合の近似的傾斜面日射量は、先の計算式による方法でまず日平均傾斜面日射量近似値を出し、各月毎換算率を乗じて推定する方法により求めた。

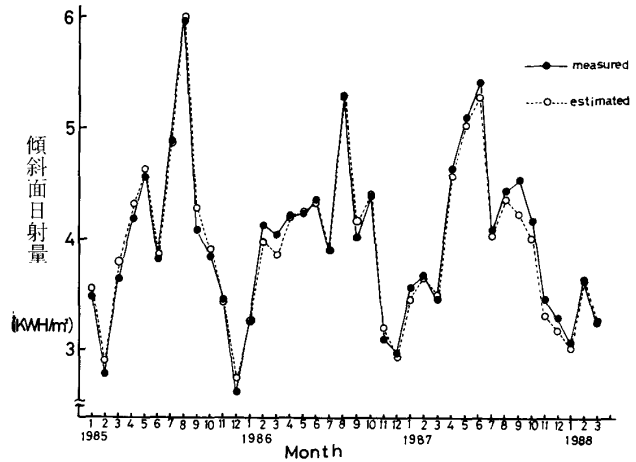


図2 傾斜面日射量の実測値と推定値

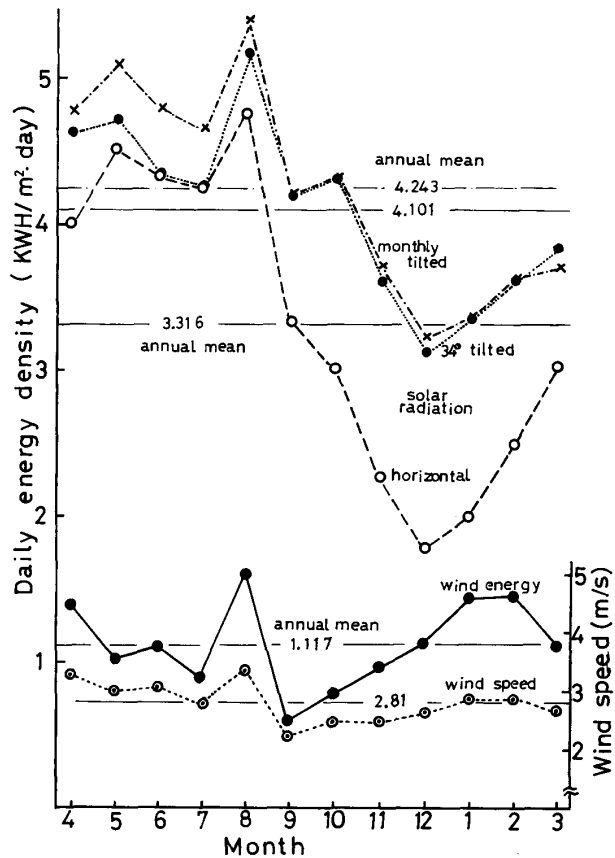


図3 月別日平均エネルギー量と平均風速

3.2 月別日平均エネルギー量

図3に5ヶ年平均の月別日平均エネルギー量（風力エネルギー量、水平面全天日射量）および平均風速を示す。単位面積当り入力されるエネルギー量は、日射量の方が多く、風力に比し多いときは5.64倍にもなる。風力エネルギー量は8月が一番多いが、これは台風の影響による

ものであり、それを除けば一般的傾向として冬から春にかけて多く秋季は少ない。水平面全天日射量は、太陽高度の影響を受けるので、春から夏にかけて多く、冬季はその1/2以下の少ない値となっている。最大値は8月の4.754 KWH/m²・dayであり、最小値は12月1.774 KWH/m²・dayであった。年間の平均値は、水平面全天日射量3.316 KWH/m²・day、風力エネルギー量1.117 KWH/m²・day、平均風速2.81m/sである。

全天日射量の大きさは受光面の傾角にも影響を受け、太陽に直面する方向に傾けた場合が一番日射量が多い。そこで、太陽エネルギーを有効に利用するには、受光面を定期的に変更する（例えば季節毎又は1ヶ月毎など）か、又は年間固定する場合には、設置地点の緯度に傾角を合わせるのが一般的である。したがって、各月毎に傾角をその月の中間日の南中時太陽天頂角に合わせた場合の傾斜面日射量と、この地点の緯度である34°に固定した場合の傾斜面日射量を、水平面日射量30分毎積算値より前述の方法で算出し月別日平均エネルギー量の5ヶ年平均値を求め図3にプロットした。

この2つの傾斜面日射量は、各月毎傾斜面の方が日射量は多くなったが、秋から冬にかけての値の差は小さい。またいずれの場合も、水平面全天日射量の値を大きく上まわっており、傾斜面日射量は秋から冬にかけての水平面日射量の少なさをカバーし、12月を除けばどの月も、水平面日射量年平均値3.316 KWH/m²・dayより多い値となる。太陽エネルギーを利用する場合、受光面の傾

きを日射量をより多くとり入れるよう工夫することが大事である。我々のシステムの場合には、年間に春、秋、冬の3回程度角度の調整を行ったが、1987年度は各月毎調整を行っている。

3.3 日平均入力エネルギー量と発電電力量

単位面積当りの風力エネルギー量、太陽エネルギー量（水平面全天日射量、傾斜面全天日射量）のデータが得られたが、これらのエネルギーを実際に風車と太陽電池に使用する場合には、入力面積に相当するエネルギー量を利用することになる。本システムの風車は、ブレード直径1.8mであるから入力面積は2.54m²、太陽電池の場合は、各素子の面積×素子数×太陽電池パネル数より0.565m²となる。

図4に利用システムのエネルギー収支（エネルギー入力量、発電電力量、消費電力量）を5ヶ年間、各月の一日あたりのエネルギー量KWH/day又はWH/dayで示した。又入力エネルギー量と発電電力量の月別変化を5ヶ年平均したものを図5に示す。

まずエネルギー入力量についてみると、太陽エネルギー入力量に比し風力エネルギー入力量の変動は大きい。8月又は冬季に大きな値を示すことが多い。発電電力量のパターンは、入力量の場合と同様であり、年平均発電効率の5ヶ年平均値は、風力エネルギーで15.0%、太陽エネルギーでは8.3%である。風力エネルギー入力量に対する太陽エネルギー入力量の割合は月により異なり、

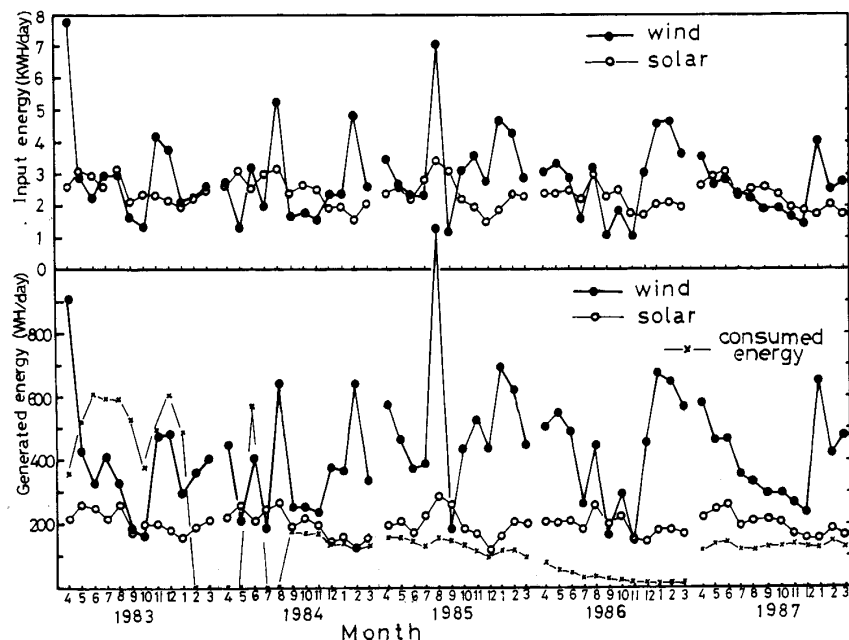


図4 利用システムのエネルギー収支の月別変化
(各月の一日当たりのエネルギー量で示す)

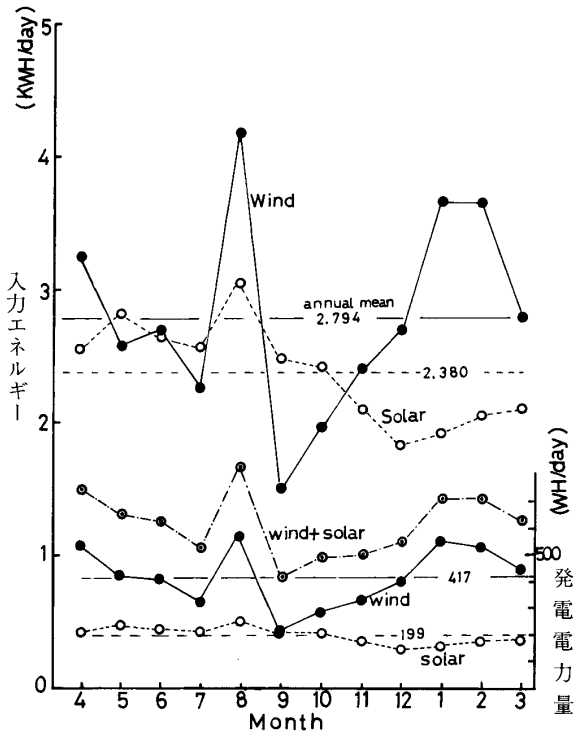


図5 日平均エネルギー入力量と発電電力量の月別変化

風力エネルギーの小さい9月には、太陽エネルギーを補完することにより、風力発電のみの場合の年間発電電力量平均値417WHを越える発電電力量を得ることになり、補完の効果があると考えられる。

風力と太陽の両エネルギーが実際に入力されている1983年度についてみると、年間のエネルギー入力量の総量は、1577.41KWH、発電電力量は160.47KWHで、利用機器での実際の消費電力量は106.68KWHである。図6に5ヶ年間のシステムの発電効率(発電電力量÷入力電力量)およびエネルギー伝達効率(消費電力量÷入力電力量)と、利用機器稼働率(利用機器稼働日数÷システム運転日数)を示した。風力エネルギー発電効率は9.4~17.6%と変動が大きいですが、太陽エネルギー発電効率は変動幅が小さい。

1984年2月以降は、6月に21日間運転した以外には風力発電機を作動させていないため、発電電力量は風速より計算された推定値である。したがってその後は太陽エネルギー利用による発電電力量のみの使用のため負荷を小さくし、室外廊下のインバータ付蛍光灯20W1台を日曜を除き毎日9時~17時(但し土曜は12時)まで点灯した。1986年度に負荷不調のため利用電力量が著しく低下したが、それを除けば平均して1ヶ月当たり2.84KWHの利用電力量となっている。エネルギー伝達効率は、風力発電機停止以後1986年度を除き5%前後で非常に小さくなった。発電電力量に対する利用電力量の割合は月平均52%であり、利用機器の消費形態について検討する必要がある。

5ヶ年平均値をみると大きい場合は9月の165%、小さいのは1月の52%である。それに対し発電電力量は、太陽電池の面積が小さく、又発電効率が風力に比し小さいこともあり、風力発電電力量が太陽電池発電電力量よりもほぼ上まわっている。全発電電力量に対する太陽電池発電電力量の割合は、平均すると大きい場合は9月48.3%、小さい場合は1月22.4%で年間通して33.0%であった。

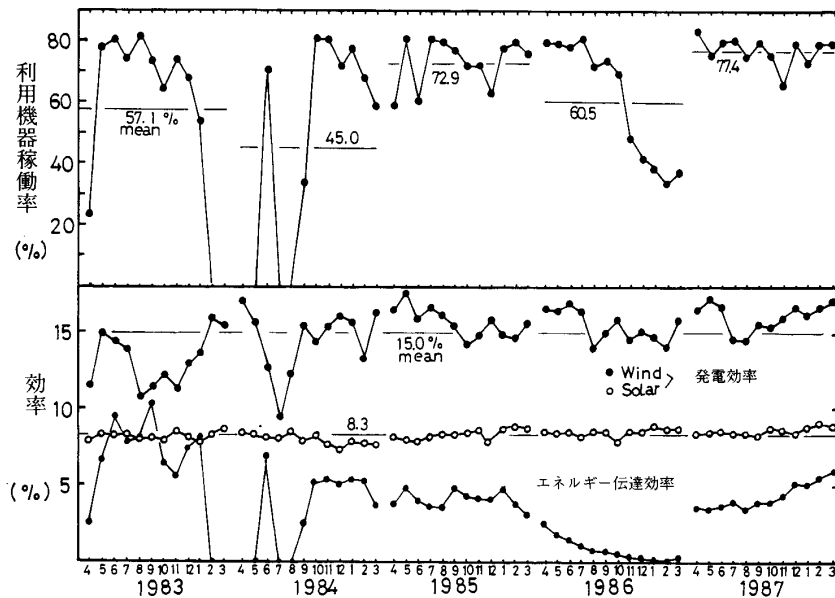


図6 利用システムの発電効率およびエネルギー伝達効率と利用機器稼働率

3. 4 太陽電池発電電力量と日射量

1987年度は、1ヶ月毎に太陽電池パネル傾斜角を各月中間日の南中時太陽天頂角に合わせた。パネルに並行して取り付けた全天日射計より傾斜面日射量を測定し、又積算電量計により発電電力量を測定した。この結果より、1日当りの傾斜面日射量と1日当り発電電力量の関係をプロットし図7に示す。ほぼ直線近似となるが、日射量が $5.5 \text{ KWH/m}^2 \cdot \text{day}$ を超えると出力がや、落ちることが分かる。又1日当りの傾斜面日射量が $560 \text{ WH/m}^2 \cdot \text{day}$ 以下では発電不能であるといえる。これらの結果より、水平面全天日射量のデータがあれば、任意の傾斜面に対する日射量と太陽電池発電電力量の一日総量が推定出来ることになる。したがって、年間固定した場合、季節毎に傾角を変更した場合等の最適傾斜角や発電電力量などを推定することが可能となった。

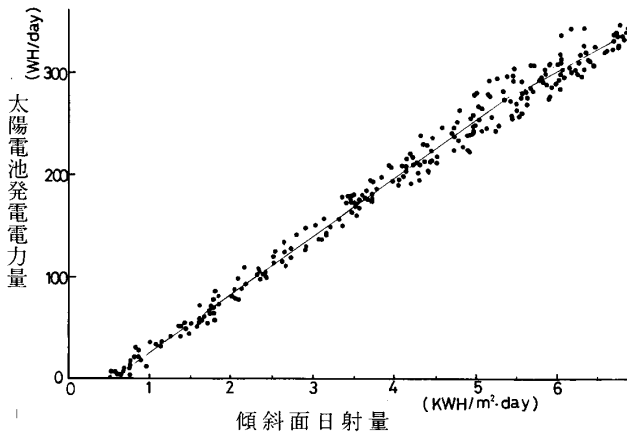


図7 傾斜面日射量と太陽電池発電電力量

4. シミュレーションによる実験結果

本システムでのバッテリー容量と消費電力の最適値を求めるために、1987年度一年間の風速、日射量のデータを用い、両システムによる入力エネルギーに対し、バッテリー容量、消費電力をいろいろ変化させ、利用機器稼働率、ダミー電力量等を求めた。

1987年度年間の運転日数に対する風力エネルギー入力量は 867.32 KWH 、太陽電池パネルによるエネルギー入力量は 809.21 KWH 、又発電電力量はそれぞれ 139.95 KWH 、 69.55 KWH で年間効率は 16.1% 、 8.6% であった。又1日当りの発電電力量は 405.6 WH/day 、 201.6 WH/day であり、太陽エネルギーによる発電電力量は、全発電電力量の 33% に相当している。この値は、5ヶ年平均値にも等しくなっている。

日平均発電電力量合計値の月別変動は、4月と1月に

ピーク値 803 WH/day をとり、夏から秋にかけ減少し、12月に最小値 395 WH/day をとる。

シミュレーションにおける利用機器はインバータ付蛍光灯 $12 \text{ V} 20 \text{ W}$ を1~5本とし毎日9時から17時まで8時間点灯する。又バッテリー容量は 12 V 、 $0 \sim 500 \text{ AH}$ の4種とし、自己放電は考えず初期貯蔵量は容量の $\frac{1}{2}$ とした。以上の条件で、30分毎の発電電力量、消費電力量、バッテリー充電率、ダミー電力量を算出し、月毎の平均値、年間の平均値等を求めた。その結果利用機器稼働率の月別変化、ダミー電力量の発電電力量に対する割合の月別変化、およびそれらの年間値の消費電力依存性が求められたので、図8、図9、図10、図11に示す。図8、図9のパターンは、入力電力量の変動に準じて、一定のバッテリー容量で消費電力を減らせば稼働率が増加する

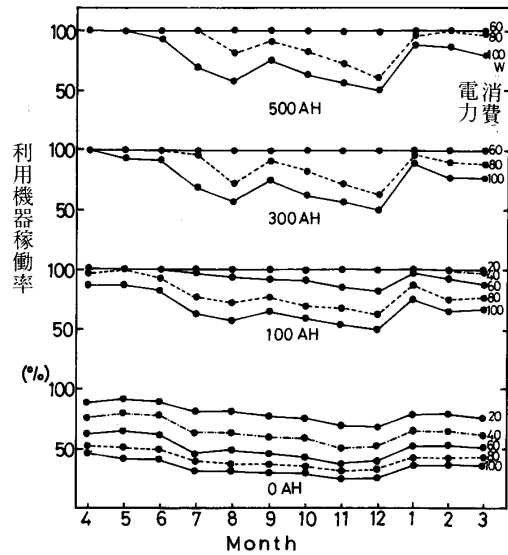


図8 シミュレーションによる利用機器稼働率の月別変化 (消費電力とバッテリー容量をパラメータとする。)

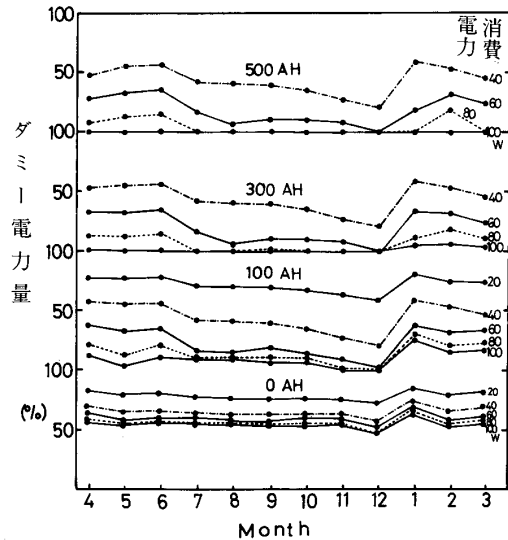


図9 シミュレーションによるダミー電力量の発電電力量に対する割合の月別変化 (消費電力とバッテリー容量をパラメータとする。)

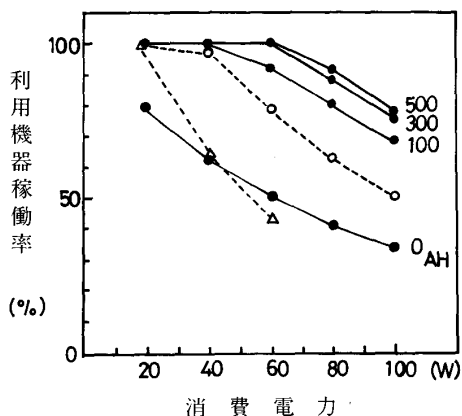


図10 シミュレーションによる利用機器稼働率の年間値の消費電力依存性
(バッテリー容量をパラメータとする。○印は風力エネルギーのみ入力の場合、△印は太陽エネルギーのみ入力の場合、ともにバッテリー容量は300A H)

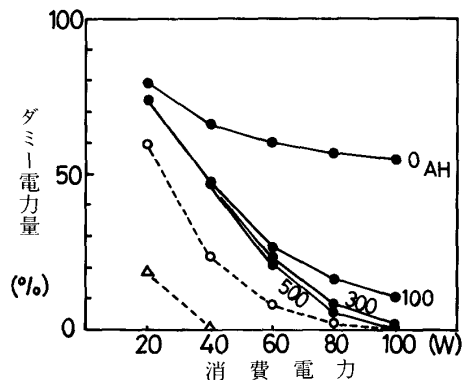


図11 シミュレーションによるダミー電力量の年間値の消費電力依存性
(バッテリー容量をパラメータとし、発電電力量に対する割合で示す。○印は風力エネルギーのみ入力の場合、△印は太陽エネルギーのみ入力の場合、ともにバッテリー容量300A H)

が、ダミー電力量の割合も増加するので、消費電力、バッテリー容量の設定の選択は難しい。図10によれば、バッテリー容量を大きくすれば稼働率は一般に向上するが、消費電力がある程度以上多いと効果は減少する。ここで、容量を300A Hに設定し稼働率100%とするならば、消費電力最大60Wが適値となりこの時の年間ダミー量は図11より23%と求められる。風力エネルギーのみの場合、太陽エネルギーのみの場合についてバッテリー容量300A Hについてのみシミュレーションを行い、年間の利用機器稼働率、ダミー電力量の消費電力依存性を求めると図10、図11の○印、△印のようになり、両システム運転によるものよりも下まわっている。バッテリー容量300A H消費電力60Wの場合、風力エネルギーのみで79.0%、太陽エネルギーのみでは43.1%の稼働率となる。両システム合わせることで稼働率は風力エネルギーによる

単独運転の場合よりも21%増加する。又ダミー電力量は風力エネルギーのみの場合の7.7%から両システムでは22.9%と上昇するので、ダミーをおさえるために消費電力量を80Wとするならば、年間稼働率は88.3%になり、ダミー電力量は8.1%となってこれも1つの適値である。この場合は風力エネルギーのみの稼働率63.1%よりも25.2%も稼働率が増えることになる。

次に補完システムとして太陽エネルギーを利用した場合の効果を検討するために、風力エネルギーと太陽エネルギーの入力面積比を変えてシミュレーションを行った。風力エネルギーの方の面積は今のシステムのままとし、太陽エネルギーシステムの入力面積を0倍、1倍、2倍、3倍と変えることにより、消費電力80W、100Wにおける稼働率の月別変動を求めると図12のようになる。稼働率が面積を増やすと共に上がっていくのは当然ではあるが、バッテリー容量、消費電力一定のもとで、非常に高い稼働率を要求する場合には、補完の効果があることになる。太陽エネルギー利用システムの面積を先の4通り変化させた場合の両システム運転による発電電力量の月別日平均値を求め、さらにその4通りの発電電力量年平均値から、各月毎の発電電力量の変動率を求め図13に示した。風力エネルギーのみの発電電力量の変動は1月が最大となり12月が最小であるが、太陽エネルギーシステムの入力面積を増やすことにより、最小の月は変わらないが、最大の月が1月から4月に移動していき、各面積毎の変動率の幅も風力のみ比べて小さくなっている。5、6月にはわずかずつではあるが変動率が上昇しているが他の月は下降しており、面積が増えるとともに変動の幅は減少していることが分かる。したがって変動幅をどのあたりにおさえるかによって複合利用の場合の面積

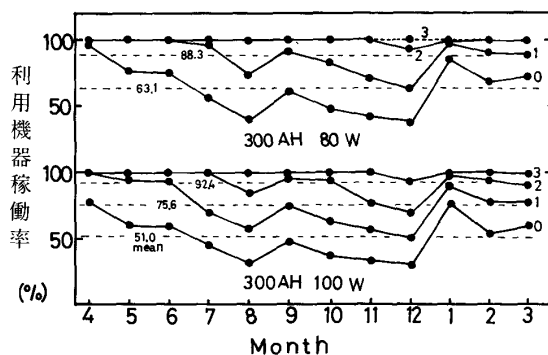


図12 シミュレーションによる利用機器稼働率の月別変化
(消費電力と太陽電池パネル面積をパラメータとする。0…パネル面積0、1…パネル面積1倍、2…パネル面積2倍、3…パネル面積3倍)

比も変わってくる。複合の目的が両者を補完し、年間一定に発電電力量を供給したい場合、どういう割合で複合すればよいか、いろんな立場から検討する必要がある。

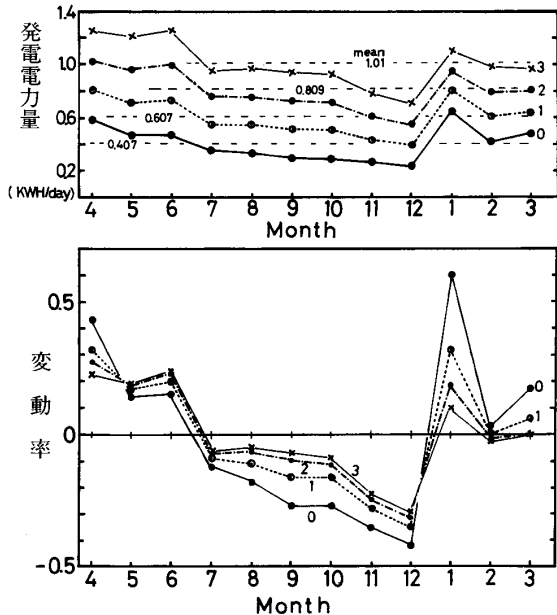


図13 太陽電池パネル面積を0～3倍の4通り変化させた場合の両システム運転による発電電力量の月別変化（上図）各月の発電電力量の年平均値に対する変動率（太陽電池パネル面積をパラメータとする。）（下図）

5. 結び

1983年4月から1988年3月までの5ヶ年の太陽と風力の複合エネルギー利用システムの運転結果より以下のことが明らかになった。

- (1) 水平面全天日射量の年間平均値は3.316 KWH / m² · day、風力エネルギー量の場合には1.117 KWH / m² · dayである。又傾斜面（34°）の全天日射量の平均値は4.101 KWH / m² · dayとなり傾斜することにより冬期の日射量の少なさをカバーできる。
- (2) エネルギー入力量の値は入力面積に比例し、風力エネルギー入力量の年間平均値は2.791 KWH / day、太陽エネルギー入力量の平均値は2.380 KWH / dayとなる。風力エネルギーの変動は大きく、秋季にはエネルギー量が少ない。
- (3) 発電電力量の年間平均値は太陽エネルギー199WH / day、風力エネルギー417WH / dayとなり、発電効率はそれぞれ8.3%、15.0%であった。
- (4) 1987年度におけるシミュレーション実験より、バッテリー容量300 A H、消費電力60Wでの年間稼働率は100%となるが、ダミー電力量は23%、又消費電力を80Wとするならば、稼働率は88.3%、ダミー電力量は8.1%となる。

(5) 風力エネルギー利用システムに対し、太陽エネルギー利用システムの入力面積を変化させると、バッテリー容量、消費電力一定の場合、面積が増えるとともに稼働率は非常に高くなる。又発電電力量の年間平均値に対する各月の発電電力量の変動率は、面積が増えるとともに変動幅が減少し、補完による効果を認めることができる。以上複合利用の場合の今後の課題として、補完をうまくとり入れた利用形態の検討をする必要がある。

6. 参考文献

- 1) 真鍋惇：『宇部市域における風力利用システムの開発に関する研究』, 昭和56年度科学研究費補助金（試験研究(2)）研究成果報告書, (1983)
- 2) 山根彌生・真鍋惇：『宇部小野田市域における風エネルギー資源の評価』, 宇部工業高等専門学校研究報告, 30, 53, (1984)
- 3) 山根彌生・真鍋惇：『風エネルギーの広域的推定値と一市域における実測値の比較』, 宇部工業高等専門学校研究報告, 33, 35, (1987)
- 4) 辻高輝：太陽電池（パワー社, 1984）
- 5) 辻高輝：『太陽電池電源の設計法』, 太陽エネルギー, Vol 19, No 6, 31, (1983)
- 6) 日本太陽エネルギー学会編：太陽エネルギー利用ハンドブック（日本太陽エネルギー学会, 1985）
- 7) 吉田作松・篠木誓一：『日射量の全国マップーその2. 月平均水平面散乱日射量とその年々の変動係数』, 太陽エネルギー, Vol 7, No 3, 50, (1981)
- 8) 吉田作松・篠木誓一：『日射量の全国マップーその3. 月平均水平面直達日射量とその年々の変動係数』, 太陽エネルギー, Vol 7, No 4, 51, (1981)
- 9) 吉田作松・篠木誓一：『日射量の全国マップーその7. アメダス・データを用いて作成した月平均全天日射量の全国細域マップ』, 太陽エネルギー, Vol 11, No 3, 20, (1985)
- 10) 吉田作松・菊地原英和・篠木誓一：『日射量の全国マップーその8. アメダス・データを用いて作成した月平均散乱日射量の全国細域マップ』, 太陽エネルギー, Vol 12, No 2, 15, (1986)

(昭和63年9月20日受理)