

宇部市域における風エネルギー特性 (II)

真鍋 惇*, 山根 彌生*

Characteristics of Wind Energy in Ube City II

Atsushi MANABE, Yayoi YAMANE

Abstract

Characteristics of wind energy at Ube city, Yamaguchi, Japan were analyzed with emphasis on yearly variation for the period April 1980 to March 1982.

Annual mean values of wind speeds were about equal in 1980 and 1981, which were 2.94 m/s and 2.81 m/s, respectively. Whereas there was significant difference between the wind energy densities per day, which were 1.37 KWH/m² and 0.89 KWH/m², respectively. This difference was caused by the frequency distribution of wind speed, especially in the frequency of strong wind occurrence.

The dependence of mean values of wind speed and wind energy on the frequency distribution was analyzed using the Weibull distribution function.

The seasonal variation of wind speed or energy density was essentially different between the two years. It is noted that the amount of wind energy in summer of particular year can exceed that of winter, although opposite behavior is common.

Probability of occurrence of daily wind energy, duration hours of weak wind and daily time evolution of wind power are also discussed.

1. ま え が き

風エネルギーの利用のためには、その資源としての特性（エネルギー密度の大きさとその時間的変動性）を明らかにし、特性に適合する利用システムを開発していくことが重要となる。

我々は山口県宇部市を例として、風エネルギー資源の特性を分析しているが、第1報¹⁾においては、1980年4月から1981年3月を調査期間とした結果について報告した。その中で風エネルギーの平均値、月別変化、日別変化、時刻別変化などの特性について分析し、資源として利用するための問題点についていくつかの検討を加えたが、種々の特性の「経年変化」を明らかにする課題が残された。経年変化を明らかにするには、長期の調査が必要であるが、今回、1981年4月から1982年3月の調査によっ

て2ヶ年間の比較が可能となり、総エネルギー量、月別変化について経年変化がかなり大きいこと、特に風エネルギーは冬期に多く、夏期に少ないという一般的傾向が逆転することなどが明らかになったので報告する。

2. 風速測定とデータ処理

風速測定の方法、データ処理の方法は第1報と同じである。1981年4月から1982年3月の測定期間における有効データ数は、16944、日数にして353日分であった。欠測の大部分は4月と8月で共に26日間のデータとなった。

3. 風エネルギー特性

3.1 年平均値

まず1980年度と1981年度の風速、エネルギー等の値に

*宇部工業高等専門学校 機械工学科

ついて比較し Table 1,2 に示す。

これより第1に指摘されることは、両年度において、年平均風速はあまり変わらないが、風エネルギー量が大きく違うことである。1980年度を基準とする年平均風速の変動率はわずか4.4%であるが、風エネルギー量のそれは35%に達する。

そこで両年度の風速の相対度数分布を比較して Fig. 1 に示す。両年度とも弱風側に片寄った分布を示しているが、相異点として1981年度の強風の出現率が1980年度に比し少ないことが挙げられる。例えば6 m/s以上の強風の出現率は1980年度11.7%、1981年度8.1%である。

Fig. 1 より年間の風エネルギー密度の風速別分布を求め Fig. 2 に示す。1981年度において最多エネルギーを与える風速(6 m/s 前後)を中心に左右対称の様な形となっている。1980年度は強風の出現率が1981年度に比し多いので、エネルギー分布は最多エネルギーを与える風速(7 m/s 前後)以上の強風側に大きく偏っている。これから風エネルギー量が強風の出現率に左右されることが分かる。これは次の Fig. 3 から明らかである。

Fig. 3 は風速の累積度数および風エネルギー密度の累積値を風速の大きい方から積算して求め、相対値で示したものである。風速の累積度数分布曲線は4 m/s 付近までは両年度とも同様なカーブを描いていて、それ以上の風速になると、1980年度の風速出現の度数が大きくなっている。それ故、 V^3 に依存するエネルギー累積値は大きな差を示している。

年間エネルギー量の推定法として、年平均風速を用いる方法がよく使われる。この方法を我々の両年度のデータに適用してみる。1978年、科学技術庁資源調査所により、1967~1976年10年間の日本付近の普遍的な風速の累積度数と年平均風速の関係が調べられた²⁾。それを Fig. 4 の曲線で示す。この曲線に重ねて、1980年度、1981年度の実測値より得られる累積度数をプロットすると、10.8 m/s以上の風速を除いてかなり曲線に近い値をとることが分かる。1980年、1981年度に測定した年平均風速を使ってこの曲線より累積度数を読み取り、横軸に風速、縦軸

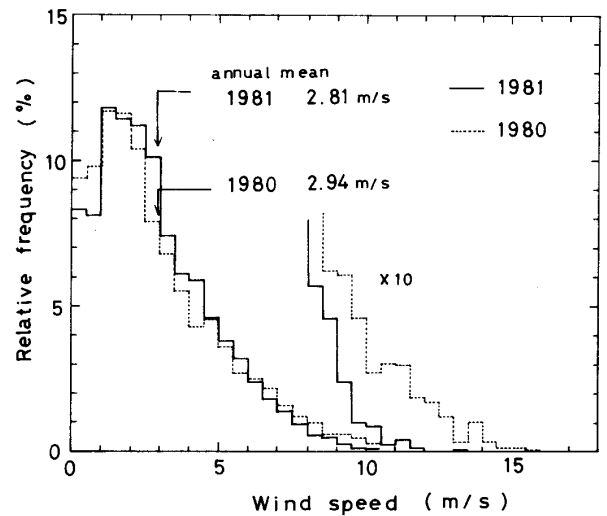


Fig. 1 Relative frequency distribution of the ten-minute mean wind speeds at intervals of 0.5 m/s (1980. 4 to 1981. 3 and 1981. 4 to 1982. 3, Ube city).

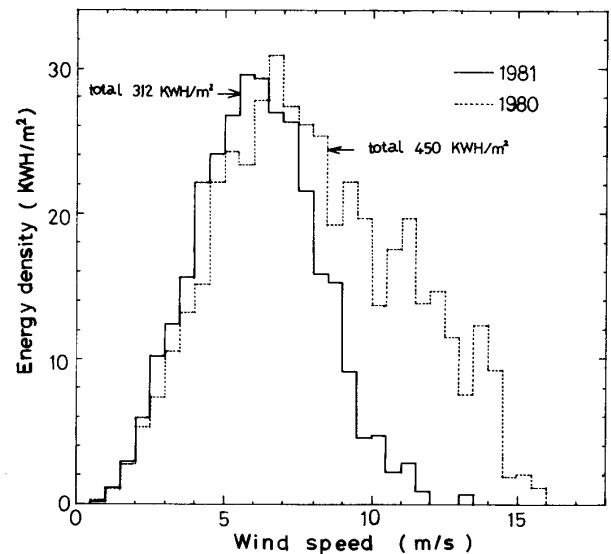


Fig. 2 Annual wind energy density as a function of wind speed.

Table 1. Wind speed and Probability of occurrence.

	Wind speed (m/s)			Probability of occurrence (%)				
	annual mean	max.	most probable	$V \leq 2.0$ m/s	$V \leq 3.0$	$V \geq 6.0$	$V \geq 8.0$	$V \geq 10.0$
1980	2.94	15.9	1.0~2.5	45.0	62.4	11.7	4.3	1.6
1981	2.81	13.1	1.0~2.5	42.8	62.1	8.1	1.6	0.2

Table 2. Energy density and power density.

	Energy density (KWH/m ²)			Power density
	total (days)	daily mean	annual (365 days)	W/m ²
1980	450.0 (329)	1.37	499.2	57.1
1981	312.4 (323)	0.89	323.0	36.9

に度数をプロットするとゆるやかなカーブを描く。これが平均的風況曲線であるが、実際の累積度数を使って風況曲線を描くと、4 m/s で上下の逆転するゆるやかなカーブとなり、先の平均的風況曲線と低風速ではよく合い、高風速では少しずれがでてくること分かる。

風速の累積度数と年平均風速との関係の曲線から、年間エネルギーを計算し、年平均風速を横軸に、年間エネルギーを縦軸にとったのが **Fig. 5** のグラフである。ここで1967年～1976年10年間の風速のデータは、風杯型風程式風速計（3杯型）により観測されたものなので、我々のプロベラ型風向風速計によるデータに比べて、約10%大きめに出てくる。これを考えに入れて1980年度、1981年度の年間エネルギーを読みとり換算すると、1980年度では 470 KWH/m²、1981年度では 410 KWH/m² とな

る。これを測定値と比較すると、それぞれ5.8%減、27%増となり、1981年度の値は **Fig. 5** の年平均風速から推定される値と大きく違いができた。これは度数分布の差に原因があることは明らかである。

次に両年度の風速の度数分布の違いを定量的に調べるために、ワイブル分布関数を適用してみる。

総度数を1とした場合のワイブル分布関数つまり確率密度関数は³⁾ $f(V):V$ の風速が表われる確率密度関数

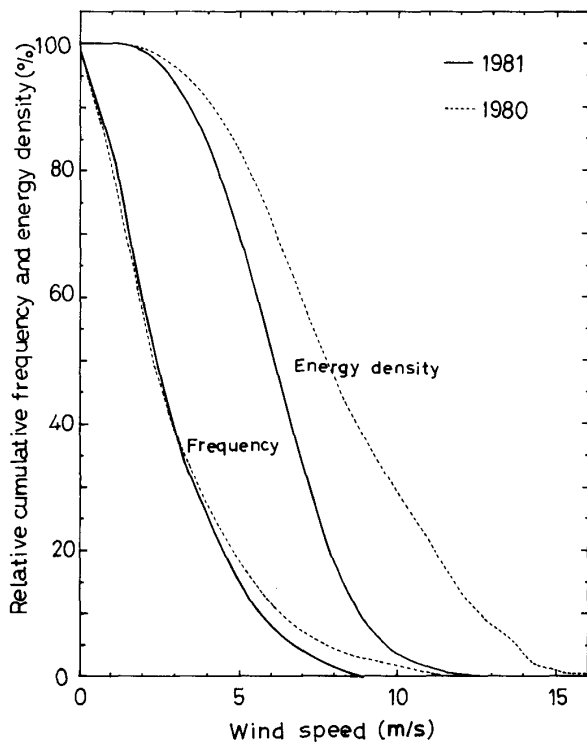


Fig. 3 Relative cumulative frequency of wind speed and relative cumulative energy density vs. wind speed.

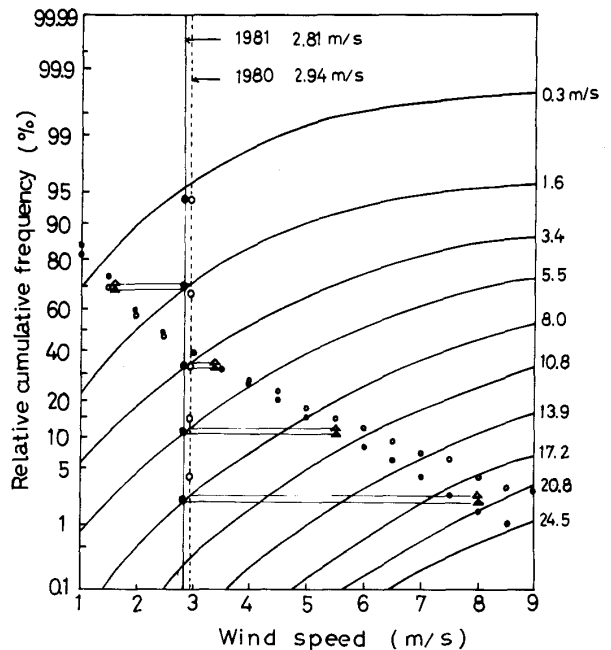


Fig. 4 Solid curve shows general relative cumulative frequency of specially fixed wind speed for annual mean wind speed²⁾ (horizontal axis).

○ and ● show observed relative cumulative frequencies for annual mean wind speed 2.94 m/s and 2.81 m/s, respectively.

△ and ▲ show derived relative cumulative frequencies of wind speed for 2.94 m/s and 2.81 m/s, respectively.

○ and ● show observed relative cumulative frequencies of wind speed for two years.

C : 尺度定数 (scale parameter)

K : 形状定数 (shape parameter)

とすると

$$f(V) = \frac{K}{C} \left(\frac{V}{C} \right)^{K-1} e^{-\left(\frac{V}{C} \right)^K} \quad (1)$$

風速が V_x 以下の確率を $F(V \leq V_x)$ で表わすと

$$F(V \leq V_x) = 1 - e^{-\left(\frac{V_x}{C} \right)^K} \quad (2)$$

ここで, $V_x = C$ とおくと

$$F(V \leq C) = 1 - \frac{1}{e} = 0.632 \quad (3)$$

となり, 相対累積度数が63.2%のVの値が scale parameter に等しいことを示している。

(2)式の両辺を2回対数をと, Kについて整理すると

$$K = -\ln \{-\ln [1 - F(V \leq V_x)]\} / \ln C \quad (4)$$

又平均風速は, ガンマー関数 (Γ) を用いて

$$\bar{V} = C\Gamma \left(1 + \frac{1}{K} \right) \quad (5)$$

風速の3乗の平均は

$$\bar{V}^3 = C^3\Gamma \left(1 + \frac{3}{K} \right) \quad (6)$$

で与えられる。

(5)式を用いて推定した年平均風速は, 実際の年平均風速と 0.03(m/s) 以下の差しかないことが知られている。

ある期間の平均の風力エネルギー密度は \bar{V}^3 に比例する。同じ期間の平均風速を \bar{V} とすると $fc = (\bar{V}^3)^{1/3} / \bar{V}$ を立方係数 (cube factor) といひ f^3 をエネルギー係数 (energy factor) という。

(5)(6)より

$$fc = \left\{ \Gamma \left(1 + \frac{3}{K} \right) \right\}^{1/3} / \Gamma \left(1 + \frac{1}{K} \right) \quad (7)$$

Fig. 6 は横軸に風速 V_x , 縦軸に相対累積度数 $F(V \leq V_x)$ をとりワイブル確率紙に記入したものである。

1m/s 以下の風速は計器の誤差が大きく, 又強風側は度数が少ないため不安定であることを考えに入れ, 1.0m/s から 10m/s の間で直線を引くとプロットした点がこの直線に沿っていることが分かる。したがって風速度数分布はワイブル分布に適合しているといえる。これより, グラフにより C, K を求め fc を導き出し, 年間エネルギー E を計算することが出来る。結果を **Table 3** に示す。

この結果を **Table 1, 2** に示されている実測値より計算した \bar{V} , E と比べてみると, \bar{V} については両年度とも非

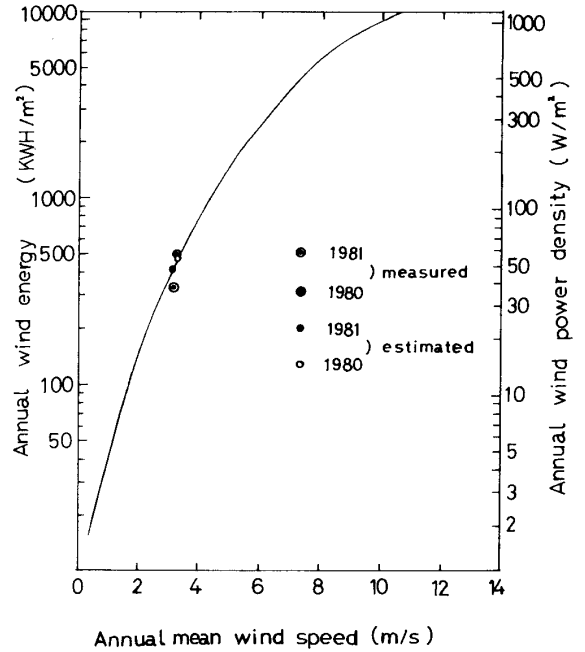


Fig. 5 Estimated wind energy and power density as a function of annual mean wind speed. Circles show the comparison between measured and estimated values in our case.

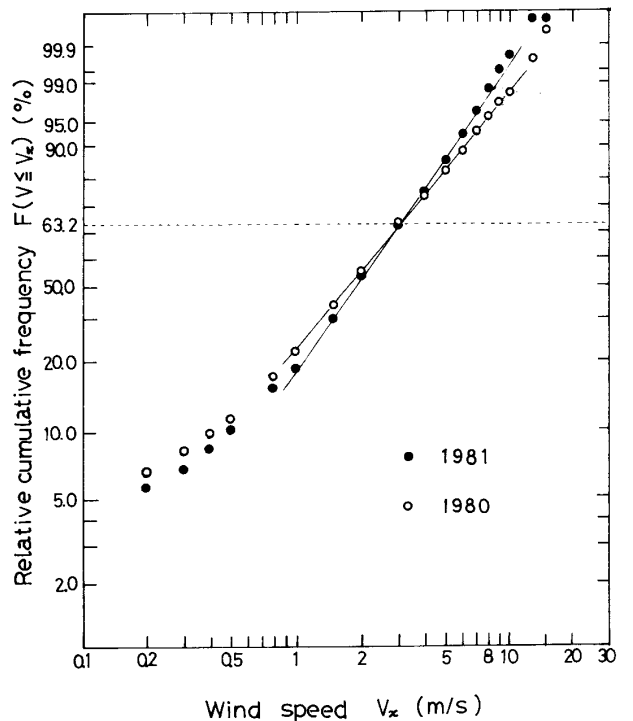


Fig. 6 Relative cumulative frequency of wind speed in two years based on Weibull distribution.

常に近い値を示しており, ワイブル分布により求められた年平均風速は 0.03m/s より小さい誤差で推定されるこ

Table 3. Estimated values (C, K) of Weibull distribution function and derived quantities from them.

fc : cube factor, \bar{V} : mean wind speed, \bar{V}^3 : mean value of cubed wind speed and E : wind energy density.

	C	K	fc	\bar{V} m/s	\bar{V}^3 (m/s) ³	E (KWH/m ²)
1980	3.1	1.186	1.599	2.93	102.4	538.0
1981	3.1	1.429	1.431	2.82	65.4	343.8

とが分かる。Eについては、Table 1,2 に示した実測値により計算される年間エネルギーよりも、1980年度では7.8%、1981年度では6.4%大きい、これはかなりよい一致であると思われる。

以上のことより、風速の度数分布はワイブル分布とよく合うが、平均風速がほぼ同じでもEが大きく違うことがある。その原因は、分布関数の形状定数Kの違いにあることが分かった。

3. 2 月別変化

月平均風速および月毎のエネルギー密度の一日平均値を Fig. 7 に示す。第1報で述べたように、1980年度には12~5月(冬~春季)に風速が大きく、年間エネルギー²⁾の%が集中していた、このことは一般的傾向と考えられている^{4) 5) 6)}。ところが1981年度にはこれと全く逆の結果となっている。すなわち、月平均の最大値は8月の3.28m/s、最小値は2月の2.09m/sであり全般的には春~夏季に強く、秋~冬季は弱くなった。エネルギー密度の変動もこれに似ていて、最大値は9月の1.22 KWH/m²・day で年平均値 0.89 KWH/m²・day の137%、最小値は2月の0.46 KWH/m²・day で年平均値の52%である。

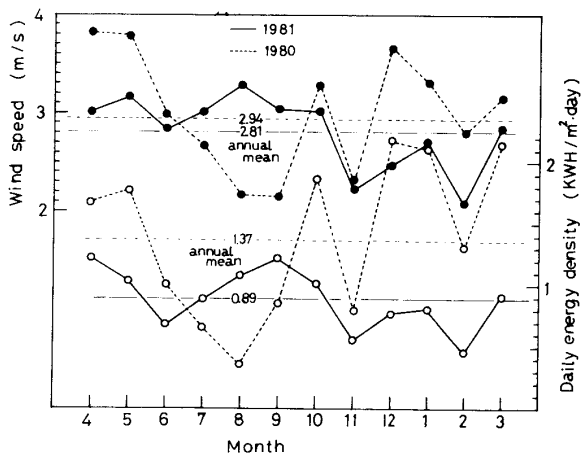


Fig. 7 Annual time-evolution of monthly mean wind speed and monthly mean of daily energy density.

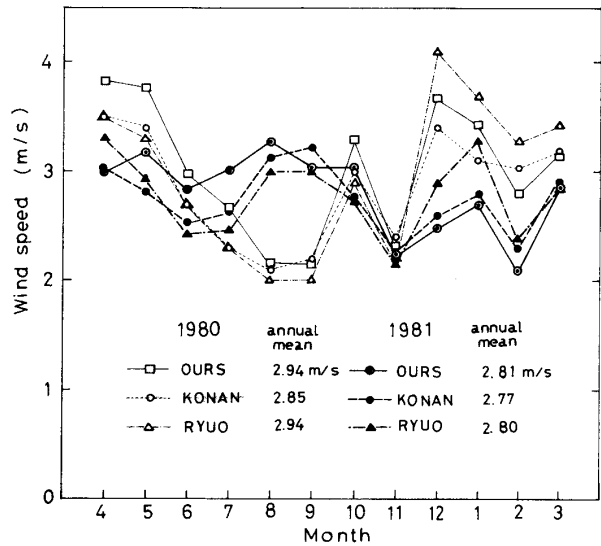


Fig. 8 Annual time-evolution of monthly mean wind speeds of our data and nearby station (Konan and Ryuo).

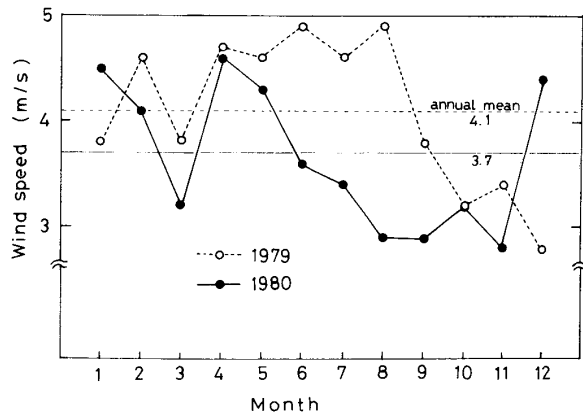


Fig. 9 Annual time-evolution of monthly mean wind speed at Ube airport.

宇部市域における両年度の月別変化がこのように逆転していることを確かめるために、山口県公害センターによって測定された宇部市域の風速データと比較してみた。Fig. 8 は、年平均風速の近い厚南支所と竜王中学校のデー

タについて整理し、我々のデータと合わせて2ケ年にわたって月別変化を示したものである。いずれの地点も1980年度に比べると、1981年度は7, 8, 9月に強くなり、冬～春季はかなり弱くなった。

実測値より計算した日エネルギー密度を縦軸に、日平均風速を横軸にとってプロットしたグラフより平均的曲線を描き、その曲線を用いて日平均風速より日平均エネルギー密度を求めるという近似的な方法を用いて3ヶ所の地点における日平均エネルギー密度、年間エネルギーを算出すると、Table 4 のようになる。

我々の測定したエネルギー値は2ケ年の差が大きい、竜王中学の値についてもそれと近い値となっていることが分かる。いずれもエネルギー値は1981年度については

大きく下まわった値となっている。1967～1976年の気象庁の統計によれば、この地点に近い福岡、広島での風速の月別変化は、冬～春季に強く7, 8, 9月に弱い値を示している。気象官署、月別気象データにより、1979年と1980年の宇部空港の月別平均風速を表わしたのが Fig. 9 である。1980年度は通常の傾向（冬～春季は強く、夏季は弱い）を示しているが、1979年の夏季は冬～春季に比べ大きな値となっており、風速の3乗に依存する風エネルギー密度は夏季にも大きくなりうるようになった。したがって、長期間の統計によれば風速の月別変化は冬～春季に強く夏季に弱い傾向を示すが、短期間の比較によるとそれが逆転することもあり、風エネルギー密度が夏に大きくなることも起こりうる。

Table 4. Wind speeds and energies of our data and nearby station (Konan and Ryuo).

	Annual mean wind speed (m/s)		Daily mean energy (KWH/m ² ·day)		Annual energy (KWH/m ²)	
	1980	1981	1980	1981	1980	1981
Ours	2.94	2.81	1.19	0.82	434	299
Konan	2.85	2.77	0.86	0.73	314	266
Ryuo	2.94	2.80	1.14	0.86	416	314

3. 3 日別変化

Fig. 10 は日平均風速の出現確率（相対度数）を年間、冬～春季（12～5月）および夏～秋季（6～11月）の各々について0.2m/s きざみで求めたものである。1980年度では、冬～春季は夏～秋季よりも強風域の度数が多いが1981年度では逆に夏～秋季の方が強風域の度数が多くなっていて、1980年度の方がその差は大きい。

日平均風速が1.0m/s以下、2.0m/s以下の弱風日の出現確率は、2ケ年ともにそれぞれ2.5%前後、35.5%前後となっている。したがって、強風域での割合の大、小がエネルギー密度の大、小に関係し、冬～春季と夏～秋季の差が大きい1980年度の方が1981年度に比べてエネルギー密度が大きくなる結果となる。

Fig. 11 は日エネルギー密度の出現確率を表わしたものであるが、夏～秋季は2ケ年について似た分布を示しており、冬～春季は1980年度の方が1981年度に比し高いエネルギー分布を示している。

日エネルギー密度の累積確率をエネルギー密度の大きい方から積算すると、Fig. 12 のグラフとなる。1980年度は冬～春季、年間、夏～秋季の日平均エネルギーの累積確率に明らかな違いがあったが、1981年度はいずれも似

たような値をとっており、2 KWH/m²·day より大きな値以上の日平均エネルギーをもつ確率は、1980年度の夏～秋季に近い値となっており、1981年度の冬～春季の日平均エネルギーの累積確率が小さいことが、年間エネルギーの減少として表われてくる。

風エネルギー利用のためにはエネルギー貯蔵が不可欠であるが、日エネルギーの累積確率によりエネルギー貯蔵容量を設計することが必要となる。又間欠性の強い自然エネルギーであるから、その持続性も考慮する必要がある。したがって、1日の風エネルギー量の自己相関、つまり連続する2日についての風エネルギー量を横軸と縦軸にプロットしてみたのが Fig. 13 である。連続する2日のエネルギー量には相関性のないことが分かる。

次に、エネルギー収集に寄与しない3m/s以下の弱風の持続性について、継続時間別出現回数を示したのが Fig. 14 である。長いときには、48～60時間（2～2.5日）も弱風が続くことが分かる。1日以上弱風の続く回数は1980年度の方が多い。最大継続時間は1980年度66時間、1981年度67.5時間であった。

3m/s以下の弱風の継続時間の累積出現率を Table 5 に示す。1日以上弱風の継続する割合は、1980年度では

17.9%, 1981年度では8.9%, 0.5日以上弱風継続の割合はそれぞれ43.8%, 38.7%であった。これらのことを考

えに入れて、エネルギー貯蔵のための電池容量を決めることが大切になる。

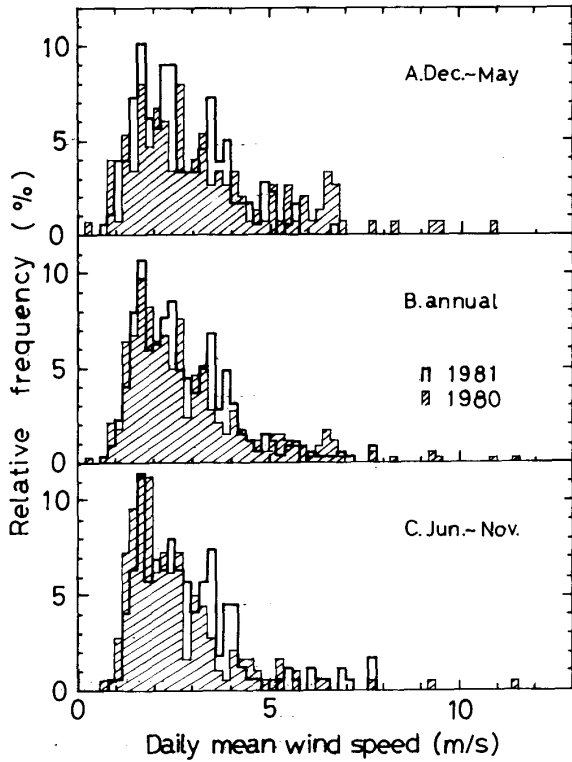


Fig. 10 Relative frequency distributions of the daily mean wind speeds for different periods.

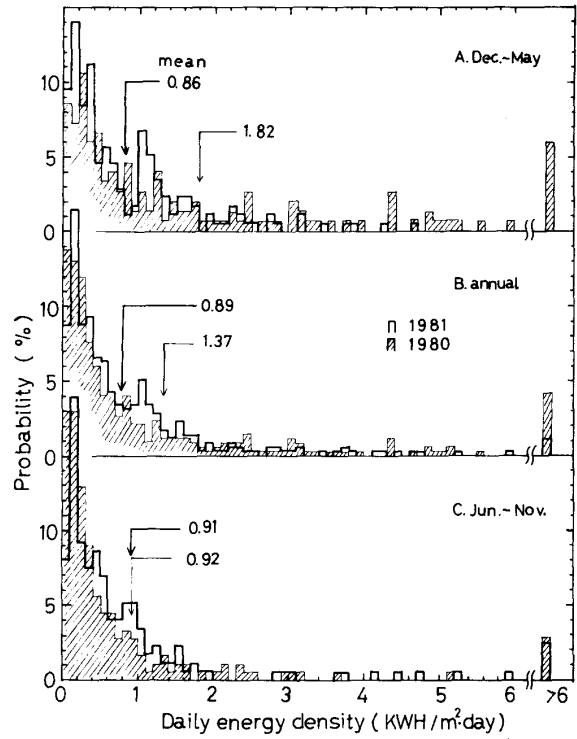


Fig. 11 Probability of occurrence of daily wind energy density for different periods.

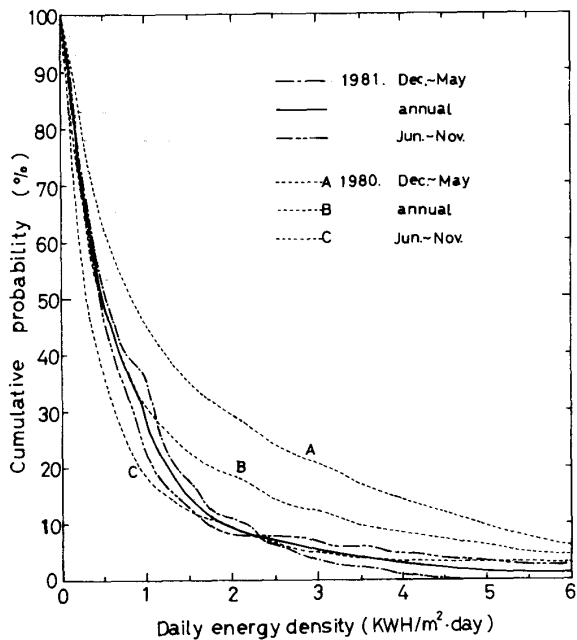


Fig. 12 Cumulative probability of occurrence of daily wind energy density for different periods.

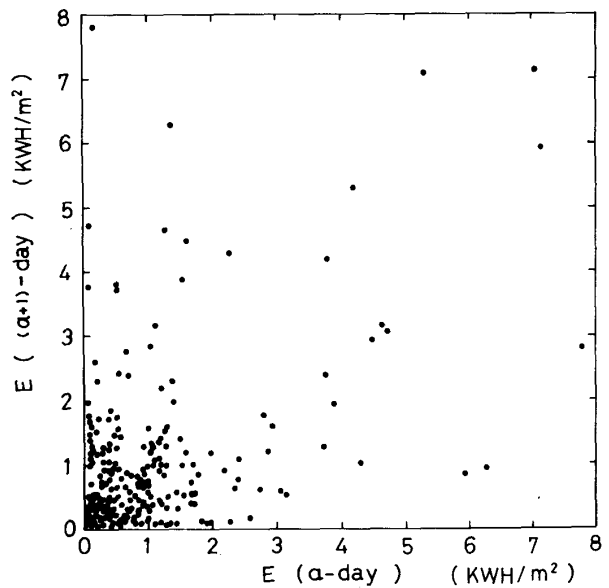


Fig. 13 Self-correlation of daily energy density. Daily energy of (a+1)-day vs. that of a-day.

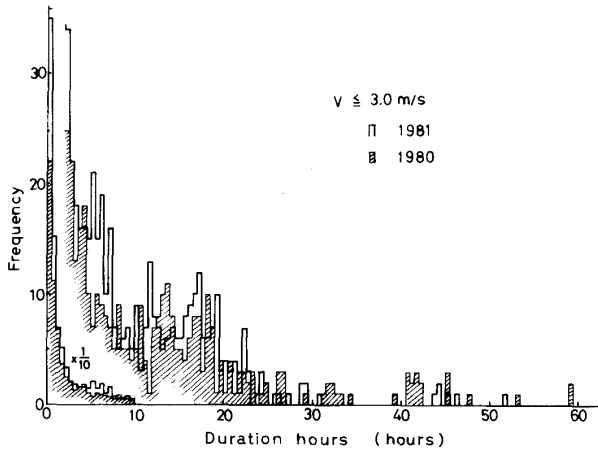


Fig. 14 Frequency distribution of duration hours of weak wind ($V \leq 3.0$ m/s).

3. 4 時刻別変化

Fig. 15 は風速の日変化を冬～春季, 夏～秋季の季節に分けて求めたものである。又年間について平均して求めたのが, Fig. 16 上部である。夜間には弱風が続き, 日の出より2時間おくらせて風が強まり14時頃にピークに達し, 14時を中心とする対称的な曲線をいずれの場合も描いている。1980年度では, 冬～春季が夏～秋季に比べ昼夜の差が大きくなっており, 冬～春季のピークは, 夏～秋季のピークの1.5倍に達し季節変化がよく表われているが, 1981年度の場合には季節による変化があまり表われない。

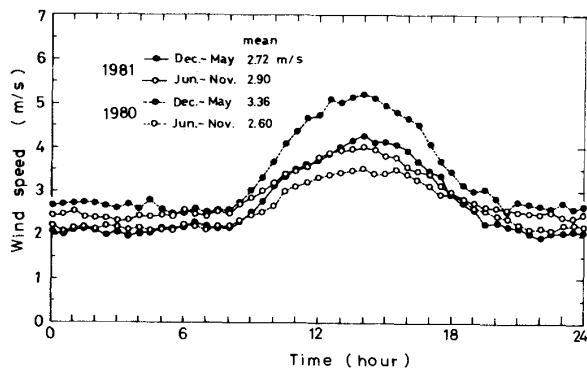


Fig. 15 Average daily time-evolution of wind speed for four periods.

年間では, 両年度ともに日変化の風速に大きな違いはない。

Fig. 16 下部のグラフは, エネルギー収集率に殆んど寄与しない 2 m/s, 3 m/s 以下の弱風の出現率の日変化を求めたものであるが, 夜間の弱風は, 2 m/s 以下では 50~60%, 3 m/s 以下では75%前後となり, 14時前後には, 2 m/s 以下では20%前後, 3 m/s 以下では35%前後

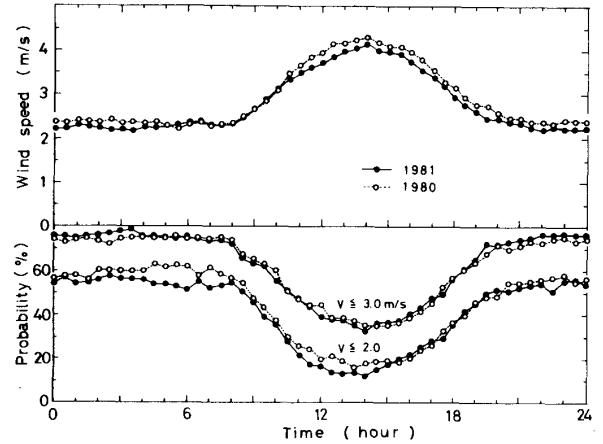


Fig. 16 Average daily time-evolution of wind speed and probability of occurrence of weak wind, ($V \leq 2.0$ and $V \leq 3.0$ m/s).

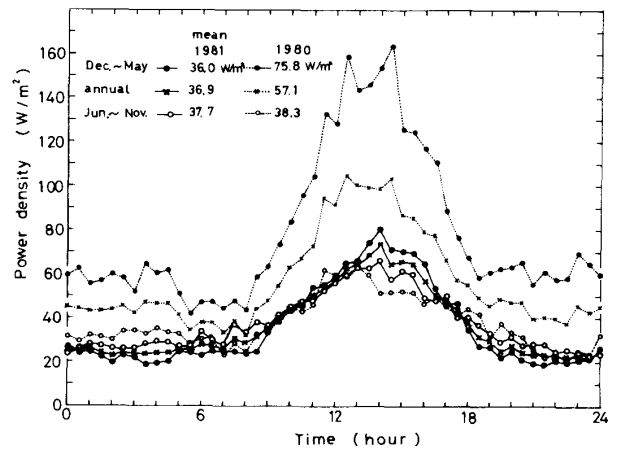


Fig. 17 Average daily time-evolution of wind power density for different periods.

Table 5. Cumulative probability of occurrence of duration hours of weak wind ($V \leq 3.0$ m/s).

duration	hours	6	9	12	15	18	21	24	36	48
1980	(%)	52.3	48.0	43.8	36.1	28.6	22.4	17.9	11.1	3.6
1981	(%)	49.1	43.2	38.7	31.6	21.7	13.6	8.9	4.1	1.4

となって、風速の日変化のグラフを逆さにしたようなグラフとなっていることが上下の比較で分かる。

Fig. 17 は風のパワー密度の日変化を求めたものである。これについても同じ様な傾向を示すが、1980年度は季節変化がよく表われているのに対し、1981年度は季節による大きな違いはなく、1980年度の夏～秋季と似た値を年間、冬～春季、夏～秋季共に示している。又冬～春季が夏～秋季に比べ14時前後でわずかに高くなってはいるが、夜間は逆転している。これがパワー密度の平均値に左右し、夏～秋季の方がパワー密度の高くなった原因となる。

冬～春季のパワー密度が1980年度に比べ1981年度は非常に低かったため、年平均風速にあまり差がなかったにもかかわらず年間エネルギーに大きな差の出た結果となっている。

4. 結 び

1980年4月～1982年3月の2ケ年の調査により、以下のことが明らかになった。

- (イ) 年平均風速は、2.94 m/s と 2.81 m/s であまり変わらなかったが、年平均日エネルギー密度は、1.37 KWH/m²・day, 0.89 KWH/m²・day と大きな差があった。この原因として、風速度数分布の違い、特に1981年度の強風の出現率が1980年度に比し少ないことが挙げられる。
- (ロ) 風速の度数分布は、ワイブル分布に当てはまり、推定される年平均風速は2.93 m/s, 2.82 m/s となり、実際に計算した値とよく合う。又年間エネルギーも10%以内の範囲で推定される。これより分布関数の形状定数Kの違いにより年間エネルギーに大きな差が出る事がわかる。
- (ハ) 長期間の統計によれば、風速の月別変化は冬～春季に強く、夏季に弱い傾向を示すが、短期間の比較によればそれが逆転することもありうる。したがって風エネルギー密度が夏に大きくなることもおこりうる。
- (ニ) 1日単位の日エネルギー密度の分布は、2ケ年についてそれぞれ 0～300 WH/m²・day, 0～200 WH/m²・day という比較的低い値に最大値をもっている。又風車の始動風速に対応する 3.0 m/s 以下の弱風継続時間は、2～2.5日と長い。これらのことから、エネルギーの有効利用のためには、貯蔵容量の最適設計が重要である。

謝 辞

資料の提供をしていただいた山口県公害センターおよび山口県宇部保健所に深く感謝する。

また本研究は、昭和55, 56年度文部省科学研究費によって補助されたものである。

参 考 文 献

- 1) 真鍋惇, 山根彌生, 金田昭久: “宇部市域における風エネルギー特性 I”, 宇部工業高等専門学校研究報告, 28, P57, (1982)
- 2) 科学技術庁資源調査所: 風エネルギーの利用に関する調査, 資料第58号, (1978. 3)
- 3) 本間琢也: 風力エネルギー読本, (オーム社1979)
- 4) 科学技術庁資源調査所: 自然エネルギーの地域的利用システムに関する調査—地域風エネルギーの有効利用—, 資料第74号, (1980. 4)
- 5) 村上周三, 加藤信介, 小峯裕己: “日本列島における風力エネルギーの地理的分布と季節変化に関する研究, 地域気象観測システムの風速データによる風エネルギーの全国分布図の作成”, 風工学シンポジウム論文集(JPN), 6 th, P365, (1980)
- 6) Donald L. Miller: “Estimating the wind's potential for small scale energy generation using available local climatological data.”, Proc. 2nd Miami Int. Conf. on Alternative Energy Sources, P 669, (1979)
- 7) 山口県統計課: 山口県統計年鑑 昭和55年刊, 昭和56年刊

(昭和57年9月16日受理)