

宇部市域における風エネルギー特性 (I)

真鍋 惇*, 山根 彌生*, 金田 昭久*

Characteristics of Wind Energy in Ube City (I)

Atsushi MANABE, Yayoi YAMANE
and Teruhisa KANEDA

Abstract

Characteristics of wind energy at Ube city, Yamaguchi Japan were analyzed from the ten-minute mean wind speed data measured at every thirty minutes during the period April 1980 to March 1981. Annual mean values of wind speed and wind energy density per day were 2.94m/s and 1.37 KWH/m²·day, respectively. The time-variation characteristics were examined by annual time-evolution of monthly energy density, the probability distribution of occurrence of daily energy density and the average daily time-evolution of wind power density. The method of the suitable design for the utilization system of wind energy was also discussed.

1. ま え が き

最近のエネルギー資源問題において、石油にかわる代替エネルギーの開発が必要となっているが、その一つとして太陽・風・地熱・波・潮などの自然エネルギーに関する調査研究が増加しつつある。このうち風エネルギーについては、日本は世界有数の賦存量をもつとされ¹⁾²⁾, その利用システムを開発するためにいくつかの調査³⁾⁴⁾が最近行なわれるなど、その資源としての特性を明らかにし有効な利用をはかることが望まれている。風エネルギーを利用する場合の問題点は、エネルギー密度が希薄であること、時間的変動および地域的変動が大きいことである。これらの問題点を克服するためには、

(イ)風エネルギーの収集・変換・貯蔵の効率を高める技術的課題、

(ロ)風エネルギーの密度とその時間的変動性（以下これを風エネルギー特性と呼ぶ）に出来るだけ適合した利用システムを開発する課題

があり、その両面を追求していく必要がある。特に後者については、具体的な地域の風エネルギー特性を調査分析することによって、その地域に適合する利用形態を

考え、有効な利用システムを設計していく必要がある。

いま風エネルギーの利用のあり方をエネルギー需要の時間的要請の面から分類すると

(イ)時間的要請が必要でない需要

(ロ)風エネルギーの時間的特性に適合する需要

(ハ)風エネルギーの時間的特性に適合しない需要

の各々に対して風エネルギーを供給する場合は考えられる。(イ)は風エネルギーの総量が需要を満せば、いつ供給されても良いという最もフレキシブルな利用形態の場合であり、自然エネルギーに最適な利用と言えるがそのような利用法はあまり存在しない。一方、(ロ)は風エネルギー量の多い季節や時間帯にエネルギー需要が多い様な場合、(ハ)は風エネルギー量が少い時にエネルギー需要が多い場合や、年間にわたって需要が一定の場合などである。このうち(ロ)の場合は、風エネルギー特性が十分把握されることによって、最も適合した利用システムが開発される。(ハ)の場合には、エネルギー貯蔵が極めて重要であるが、この貯蔵サブシステムの容量などを設計するために風エネルギー特性が必要である。このように風エネルギー利用の開発には、風エネルギー特性が重要な役割を果たすが、その調査、分析、評価の方法やこれを用いた

*宇部工業高等専門学校 機械工学科

風エネルギー利用システムの設計法はまだ十分に確立されいとは言えない。風エネルギー特性の調査、分析の例はあっても、系統的に解析している報告⁵⁾⁶⁾は少ない。

本研究は山口県宇部市域を例として、風エネルギー特性の調査と分析を試み、その方法について検討するとともに、宇部市域における風エネルギー利用システム開発のための基礎資料を得ることを目的とするものである。本報告はその第一段階として、1980年3月から1981年4月を調査期間とした結果について述べている。

調査地点の宇部市は、西瀬戸内小気候区の西端部に位置し、北九州型気候区との交界地帯をなしていることおよび周防灘に半島状に突き出ている上に後背地に高い山がないことなどから、瀬戸内の他の沿岸に比べ風力がかかなり強いと言われている⁷⁾。従ってこの地域における風エネルギー利用システム開発の可能性や問題点を探ることは有意であろう。

2. 風速測定とデータ処理

風エネルギーの定量のために風速測定を行った。風速測定の地点は宇部工業高等専門学校（山口県宇部市常盤台）の化学棟で北緯 $33^{\circ}57'6''$ 、東経 $131^{\circ}16'34''$ の位置である。風速計は海拔で50m、地表面から17m、屋上から5mの高さに設置した。周辺は常盤台という丘陵の上で、見通しは極めてよく、また海岸線からの距離は2kmである。

プロペラ型風向風速計（光進電気工業KE-500型コーシンペン）よりえられる毎時瞬間風向風速に対応する電圧信号を平均回路に入れ、前10分間の平均風向、風速を2ペンレコーダおよびデータ集録装置に記録し、30分毎の測定値をパーソナルコンピュータに入力しデータ処理を行った。風向データについては本報告ではとりあげない。

測定期間は1980年4月から1981年3月で、有効データ数15792、日数にして329日分である。欠測の大部分は1980年4月と5月で、両月は16日間のデータとなった。

風エネルギーは空気の運動エネルギーであり、気流に直角な単位断面積あたりのパワー密度は、空気の密度を ρ 、風速を V とすると

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 \quad (\text{W/m}^2)$$

である。風のエネルギー密度（単位断面積を一定期間に通過するエネルギー流量と定義する）は、30分毎の10分

平均風速 V_i より

$$E = \frac{1}{4} \rho \sum_i V_i^3 \quad (\text{WH/m}^2)$$

として求める。 ρ の値は大気温度、湿度、気圧によって $1.1 \sim 1.3 \text{ kg/m}^3$ の範囲で変化するが、ここでは 1.20 kg/m^3 の値を用いた。

3. 風エネルギー特性

3.1 年平均値

まず一年間の風速データの相対度数分布を 0.5 m/s 間隔で求め Fig. 1 に示す。年間を通じての最多風速は $1 \sim 2 \text{ m/s}$ であり、その出現率は23%に達する。年平均風速は算術平均値で定められており今の場合 2.94 m/s となる。風速分布が正規分布から大きくずれているため、年平均風速が最多風速よりかなり高くなることに注意すべきである。この間の最大風速は10分間平均値で 15.9 m/s （1980. 9. 11, 13時）であった。

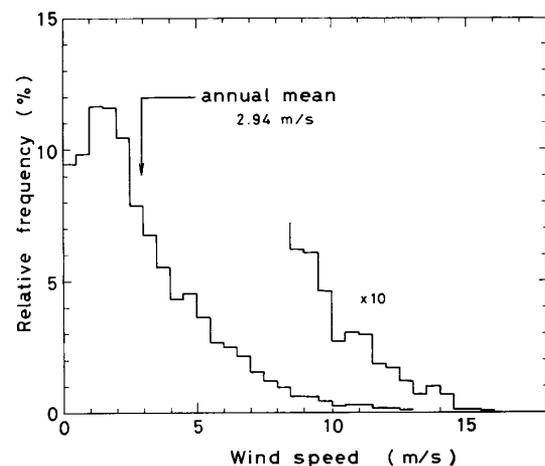


Fig. 1 Relative frequency distribution of the ten-minute mean wind speeds at intervals of 0.5 m/s (1980. 4 to 1981. 3, Ube city)

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。風エネルギーの V^3 依存性のために最多風速や平均風速の風が年間に供給するエネルギーはわずかであり、最多エネルギーの風速は出現確率2%に満たない 7 m/s 前後の風である。

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が Fig. 3 である。このうち風速の累積度数分布は風況曲線といわれ、風速の累積持続時間あるいは累積出現確率をあらわす。Fig. 3 より風車の始動風速が与えられると

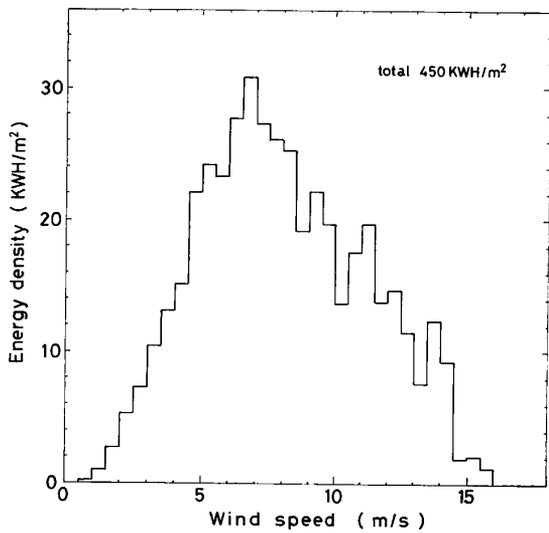


Fig. 2 Annual wind energy density as a function of wind speed.

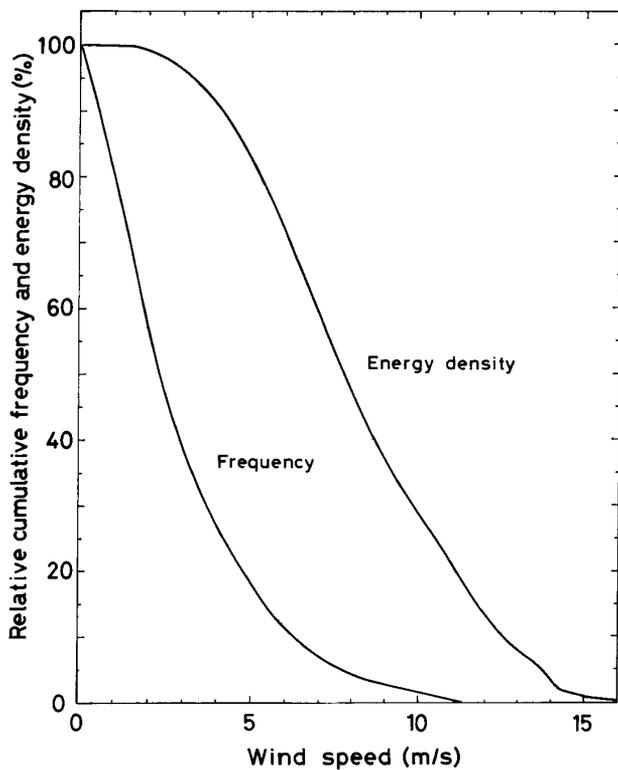


Fig. 3 Relative cumulative frequency of wind speed and wind speed dependency of relative cumulative energy density.

風車の稼働率およびエネルギー収集率が定まる。ここで風車のエネルギー収集率とは、年間あるいは一定期間の風エネルギー密度のうち風車に収集されその回転に寄与するものの割合、すなわち始動風速以上の風のエネルギ

ー密度の全エネルギー密度に対する割合と定義する。今年始動風速3.0m/s の場合について見ると、年間の稼働率は40%となりかなり低いがエネルギー収集率は96%に達する。一般に始動風速を低くするには限界があり、また効率の低い風車形式(サボニウス型など)を採用することになる。3.0m/s は効率の高い風車(プロペラ型)を始動できること、始動風速をより低くしても、エネルギー収集率は殆んどふえないので稼働率の向上は意味がないことから、宇部市においては始動風速は3 m/s 前後が適当であらう。

次に風エネルギーを有用な形態のエネルギー(回転エネルギーなど)に変換する割合をエネルギー変換率と定義すると

エネルギー変換率=収集率×風車の効率
なる関係がある。風車の効率は一般に風速依存性をもつがそのうち最大効率を与える風速すなわち設計風速に関しては Fig. 2 より6~7 m/s に設定したとき年間にえられるエネルギー量が最大となることがわかる。なお、現実の始動風速、設計風速の最適設計に際しては、風車規模、発電機などの負荷の特性をはじめ多様な要因を考慮する必要がある。

次にエネルギー密度の絶対値についてみると

年間エネルギー密度……………450.0 KWH/m²
(329日分)

年平均の日エネルギー密度……1.37KWH/m²・day

年平均パワー密度……………57.1 W/m²

となった。この量は一定の利用価値のある量であると考えられる。例えば一家庭の消費電力量は5~10 KWH/day であるが、これは受風断面積4~8 m²に入る一日の風エネルギー量である。システムの総合効率として20~40%を考慮しても、宇部市域の風エネルギーは総量あるいは年平均値としては一定の利用価値があらう。しかしながら問題はエネルギー密度が年間を通じて一様に分布してなくて多様な時間的変動を示すことである。

3. 2 月別変化

月平均風速および月間のエネルギー密度の一日平均値の月別変化を Fig. 4 に示す。月平均風速の最大値は4月の3.82m/s、最小値は8月と9月の2.15m/s であり、全般的には冬季および春季に強く、夏季に弱い。エネルギー密度の変動中はさらに大きく、最大値は12月の2.18 KWH/m²・day で年平均値の159%、最小値は8月の

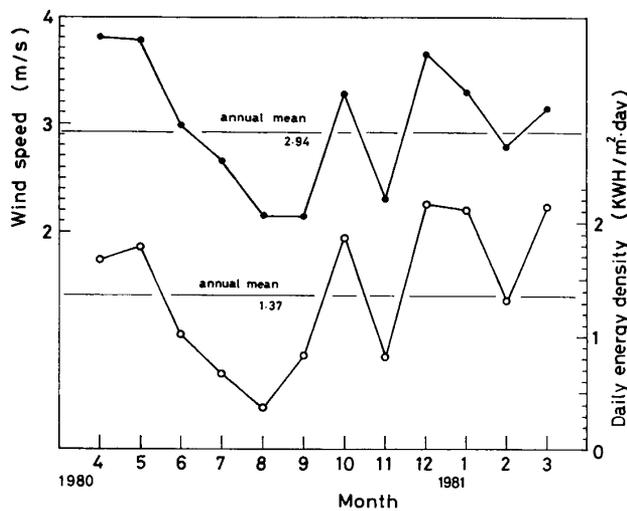


Fig. 4 Annual time-evolution of monthly mean wind speed and monthly mean of daily energy density.

0.37 KWH/m²·day で年平均値の27%しか得られない。年平均以上の密度が得られるのは12月～5月でこの半年間の日エネルギー密度の平均値は1.82 KWH/m²·day となり、一方6月～11月には0.92 KWH/m²·day である。つまり冬～春季に年間エネルギーの2/3が集中しているのが大きな特長である。

従って風エネルギーを利用するにあたっては、冬～春季にエネルギー需要の多い利用形態のものが適している。年間を通じて均等なエネルギー需要に対しては太陽光エネルギーなどと組み合わせて互いに補充するようなシステムを考える必要がある。

3.3 日別変化

エネルギーの消費形態には一日周期のものが多く考えられるので、日単位の平均風速とエネルギー密度の特性も重要である。Fig. 5 は日平均風速の相対度数、すなわち出現確率を年間、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 のきざみで求めたものである。日平均風速の最大値は11.4m/s (10月22日)、最小値は0.39m/s (3月1日)であった。年間出現確率の最大は1.6～1.8m/sにあり約10%である。この風速は年間最多風速とほぼ一致している。また日平均風速が1.0m/s 以下、2.0m/s 以下の弱風日の出現確率はそれぞれ2.7%、35.6%であり、一方5.0m/s 以上、10.0m/s 以上の強風日はそれぞれ13.1%、0.6%となっている。冬～春季、夏～秋季には日平均風速の分布が年間分布よりそれぞれ高風速側、低風速側へシフトしピーク高さなども変化する。

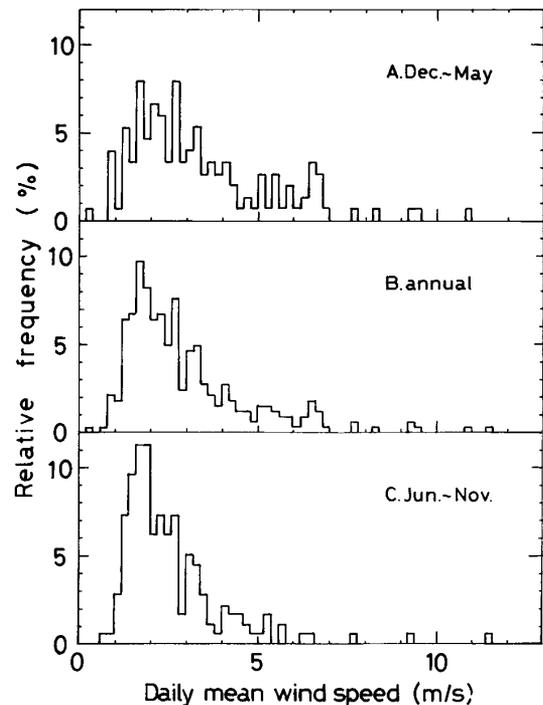


Fig. 5 Relative frequency distributions of the daily mean wind speeds for three periods.

日平均風速 $\bar{V} = \sum_{i=1}^{48} V_i / 48$ と日エネルギー密度 $(\rho/4) \sum_{i=1}^{48} V_i^3$ の相関を Fig. 6 に示す。曲線は \bar{V} より計算され

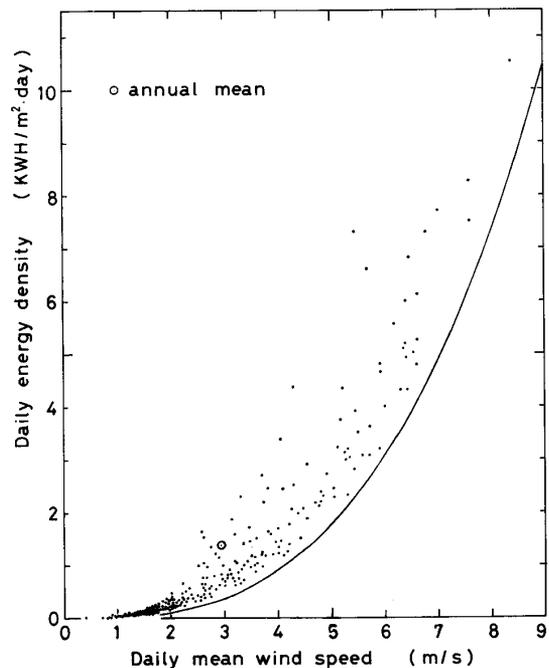


Fig. 6 Correlation between daily wind energy density and daily mean wind speed. Each dot is obtained from 48 data of wind speed in a day and line is calculated from daily mean wind speed using $12\rho\bar{V}^3$.

るエネルギー密度 $120\bar{V}^3$ であるが、実際の日エネルギー密度はこの計算値より高く、またかなりの巾をもつことがわかる。

329日分の日エネルギー密度は、最小値 $4.2\text{KWH/m}^2 \cdot \text{day}$ (3月1日) から最大値 $23.4\text{KWH/m}^2 \cdot \text{day}$ (10月22日) の広範囲に分布している。Fig. 7 に示すその分布は、日エネルギー密度の出現確率分布とも読める。図より出現確率のピークは $0 \sim 300\text{KWH/m}^2 \cdot \text{day}$ の所にあり、そこから高エネルギー密度側へ出現確率の低い裾が長くのびているのが特長である。日単位でエネルギーを利用する立場からは、毎日得られるエネルギー量ができるだけ均等であることが望ましいから、風エネルギーの利用のためにはエネルギーの過剰分をもって不足分を補うためのエネルギー貯蔵が不可欠となる。なお、冬～春季と夏～秋季は日エネルギー密度の平均値が異ると共に確率分布にもかなりの差異が生じている。

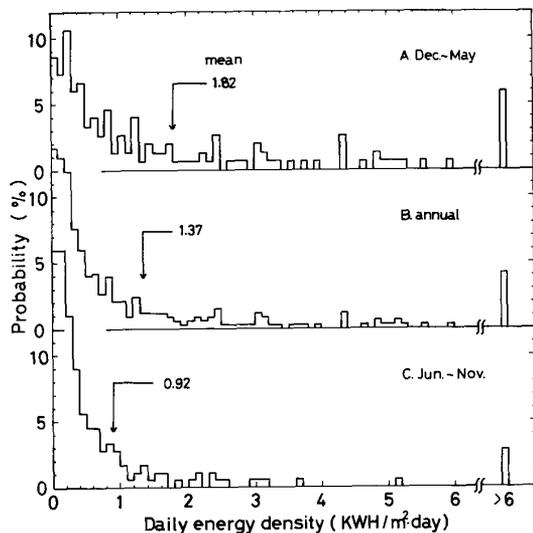


Fig. 7 Probability of occurrence of daily wind energy density for three periods.

そこで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し Fig. 8 を得る。冬～春季はエネルギー密度が多いので曲線の平均曲率が小さくなっている。図より例えば、 $1.0\text{KWH/m}^2 \cdot \text{day}$ 以上の日エネルギー密度を確保できる確率は、年間では31%、冬～春季では45%、夏～秋季では18%であることがわかる。これよりエネルギー貯蔵の効果を推定することができる。今、一日のエネルギー需要量をまかなうに必要な風エネルギー密度を a ($\text{KWH/m}^2 \cdot \text{day}$) とし、 a 以上の風エネルギー密度が得られる日の出現確率を $P(a)$ とするとき、エネルギー貯蔵容量を備えないシステムでは、エネ

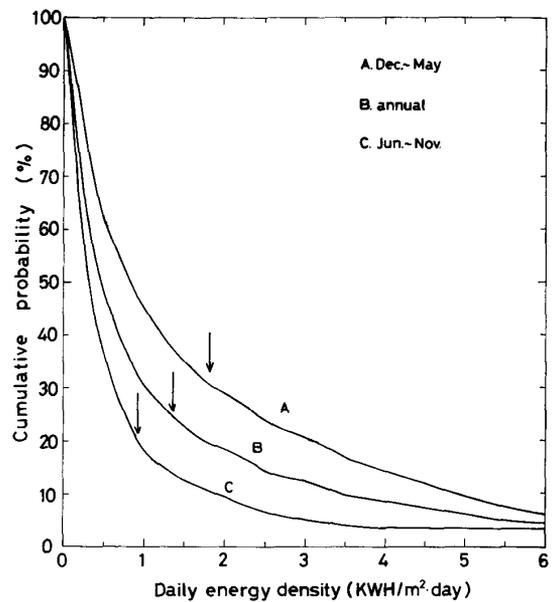


Fig. 8 Cumulative probability of occurrence of daily wind energy density for three periods. Arrows show mean values.

ルギー需要が満たされる日数の割合 (以下有効利用率と言う) は $P(a)$ である。ただしここでの貯蔵容量には、24時間以内の貯蔵のため必要な容量は含めていない。次に風エネルギー密度 a にエネルギー変換率を乗じた量のエネルギーを貯蔵できる場合には、 $2a$ 以上の風エネルギー密度の日 (その出現確率 $P(2a)$) に単位面積あたり a の貯蔵が行なわれ、その後につづく a 以下の日にも需要が満たされることになる。ただし $2a$ 以上の日が連続する場合には貯蔵できない。このような考察によって一日あたりの需要量、有効利用率と貯蔵容量の関係を計算できる。ここではそのような計算結果の例を示すとどめる。近似的な計算の結果、 $a = 1\text{KWH/m}^2 \cdot \text{day}$ とし、年間の有効利用率を50%とするためには、少なくとも 2KWH/m^2 の貯蔵容量が必要である。このとき冬～春季の有効利用率は65%に上昇するが、夏～秋季には約30%となってしまふ。

3. 4 時刻別変化

Fig. 9 と Fig. 10 は風速および風のパワー密度の一日の内での変化の平均的パターンを求めたものである。風速については、年間、冬～春季、夏～秋季のどの場合も同様のパターンを示し、夜間には弱風が定常的につづき、日の出から2時間程おくれて風が強まり、14時ごろに年平均値よりかなり高いピークに達し、20時ごろには夜間の弱風にもどる。特に冬～春季の14時前後の平均風

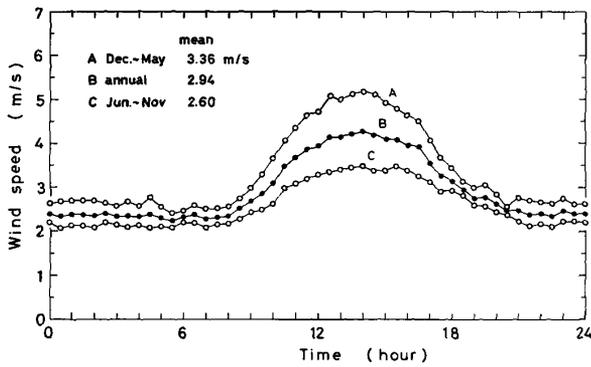


Fig. 9 Average daily time-evolution of wind speed for three periods.

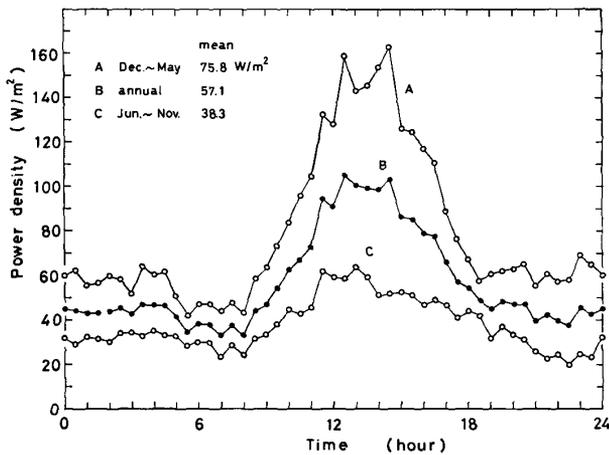


Fig. 10 Average daily time-evolution of wind power density for three periods.

速は5.2m/sに達する。またどの平均期間においても14時を中心とする対称性の高い曲線となっている。

風のパワー密度についても同様の傾向がみられるが、平均期間による差異が出てくる。夏～秋季には昼夜の差異が比較的少ないが、冬～春季には8時～20時のエネルギー密度は一日の64%を占める。特に冬～春季の昼間には150W/m²に達するパワー密度が2時間近く続く。その他にピークの位置が平均期間によって異っていること、風速パターンには殆んどみられなかった短周期の変動が見られることなどが指摘できる。

エネルギー利用の立場からみると、風エネルギーは日中の利用に適しているといえる。エネルギー需要が一日中平均している場合や、朝、夕に高い場合には、一日の時間内にもエネルギー貯蔵の必要がある。

4. 結 び

1980.4～1981.3の調査による宇部市域の風エネルギー

特性に関して以下のことが明らかになった。

- (イ) エネルギー密度の年平均値は 1.37 KWH/m²・day で総量としては例えば家庭用などに利用する価値のある量である。
- (ロ) しかしながら風エネルギーの時間的変動は大きく、まず年間の分布では全体の2/3の量が12～5月に集中している。従ってこの季のエネルギー需要が多い利用形態であれば適しやすい。年間を通じて均等なエネルギー供給を風だけで行うことは効率的でない。
- (ハ) 一日単位のエネルギー密度は年間を通じて、季節毎に見ても広い分布を示し、分布のピークを与えるエネルギー密度は0～300 WH/m²・day という低さであり、エネルギーの安定で効率的な供給のためには貯蔵容量の最適設計が重要である。日エネルギー密度の累積出現確率の分布よりその設計資料がえられる。
- (ニ) 一日のうちでは昼間のエネルギー密度が高く、それは冬～春季に特に顕著である。
- (ホ) 風況曲線と風速別風エネルギーの累積曲線から、風車の始動風速として3.0m/s前後が適当で、このとき風車の稼働率、エネルギー収集率は各々年間で40%、96%となる。また風エネルギー密度の風速別分布特性より風車の設計風速を6～7m/sとすると、得られるエネルギー量が年間総量に関するかぎり最大となる。

今後の課題として、経年変化と宇部市域内での地域変化を調査分析して風エネルギー特性をより系統的に評価することが必要である。

謝 辞

本研究の開始と遂行にあたって多くの御教示を下された宇部工業高等専門学校機械工学科教授竹重正雄先生、資料の提供や助言をいただき御世話になった湯浅電池株式会社製品技術センター WPG 主幹松本完氏に厚く御礼申しあげる。

また本研究は、昭和55年度文部省科学研究費によって補助されたものであることを付記する。

参 考 文 献

- 1) 本間琢也：風力エネルギー読本，（オーム社1979）
- 2) I. Ushiyama：“The Development of Wind

- Power Utilization in Japan”, Technocrat 11, 4, 23 (1978)
- 3) 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)
- 4) 科学技術庁計画局：風エネルギーの有効利用技術に関する調査報告—「風トピア計画」調査報告，(1980 . 11)
- 5) P. S. Putnam : *Power from the Wind* (Van Nostrand Reinhold Company., New York 1948)
- 6) L. Jarass : *Wind Energy* (Springer-Verlag, Berlin 1981)
- 7) 宇部青年会議所環境問題委員会：うべ昔ばなし (1979)

(昭和56年9月28日受理)