

温室の環境制御における風エネルギーの利用

誌名	野菜試験場報告. A = Bulletin of the Vegetable and Ornamental Crops Research Station. Series A
ISSN	03875407
著者	内藤, 文男
巻/号	8号
掲載ページ	p. 231-248
発行年月	1981年11月

温室の環境制御における風エネルギーの利用

I 武豊における風況特性†

内 藤 文 男*

I 緒 論

自然エネルギーの利用は、いわゆる、ソフトエネルギーパスとして世界的にも関心が持たれ、我が国でも、サンシャイン計画、あるいは、グリーンエナジー計画など、ナショナルプロジェクトのような規模で、幅広く研究されている。このような情勢の中で、科学技術庁では、風車による風エネルギーの有効利用技術の開発を目的とした風トピア計画が、1978年から2か年間実施された。本研究は、その一環として、風エネルギーの農業部門、特に温室の環境制御への適用を検討したものである。

風車を介した風エネルギー利用の歴史は極めて古く、紀元前3,600年頃、既に、揚水や灌漑に用いられていたと言う(本間, 1979)。しかし、その利用技術の発達は、他の動力源のそれと比べると著しく遅れている。それは、風の間欠性、風車で得た動力の遠距離輸送の困難性、並びに、風車出力の限界などが主な理由とされている。更に、我が国では台風対策が困難なこと、水利がよく発達していたことなどが加えられる。これらのうち大部分は、今日でもなお、風車利用上の難点として残されている。

古来の風車利用は、揚排水や製粉が主であった。風車による発電は、1891年に至って、デンマークのアスコフで実施されたものが最初と言われており、以来、西欧その他の諸国で研究開発が進められている(牛山, 1979)。

我が国では、戦後、電力事情の不安定な時期、北海道の開拓農家に300~600W程度の発電用風車が1,543台納入された実績がある。また、当時は、航空関係の研究が禁止されていたため、大学の航空関係の研究者によって風車の設計が行われた例もあった。しかし、これらも、経済の高度成長に伴う電力網の整備に従って、普及は停滞した。ところが、最近の石油事情から風エネルギーの利用が再び注視されるようになり、実用化のための研究

が、東京大学航空宇宙技術研究所(AZUMAら, 1979)、足利工業大学(牛山, 1978)、東海大学(KATO, 1979)、海上保安庁(本間, 1979)などにおいて実施されている。更に、最近では、風エネルギーを直接熱変換する方式も研究されている(喜多, 1978)。

このような、風車を用いた風エネルギーの利用に当たっては、まず、利用場所における風エネルギーの賦存量、また、それと関連して、風況特性や風エネルギーの変動特性の解明が不可欠である。次いで、これら諸特性に対応した風車の設計と開発、及び、風車を中心とした風エネルギー利用システムの設計、並びに、制御法の確立というシステム研究が必要である。本報告では、これらのうち、愛知県武豊町における風車利用を前提とした風況特性、並びに風エネルギー賦存量を解析した結果を報告する。引き続き、次報には風車による風エネルギーの電力変換、及び、温室の環境制御への適用に関する試験の結果を報告する。なお、風トピア計画は1980年3月末で終了したので、1980年度は野菜試験場の経常研究の中で実施した。その結果も併せて報告する。

研究の実施に当たっては、科学技術庁計画局資源課内に設けられた風車利用検討会(委員長:工学博士 東 昭 東京大学航空宇宙技術研究所教授)、中部地区風車利用検討会(委員長:工学博士 松田龍夫 中部科学技術センター専務理事)構成委員の諸氏に懇切なる御指導と御援助を、また、農学博士 内嶋善兵衛 農業技術研究所物理第1研究室長には論文の御校閲を賜わった。更に、毎日の観測とデータの整理には小荒満子女士に御援助をいただいた。ここに記して、深甚の謝意を表す次第である。

II 試験方法

I 風速・風向、及び風エネルギーの測定

a 測定場所

風速・風向計は、愛知県知多郡武豊町、野菜施設栽培

* 施設栽培部

† 本研究の一部は、日本農業気象学会昭和55,56年度全国大会において発表した。

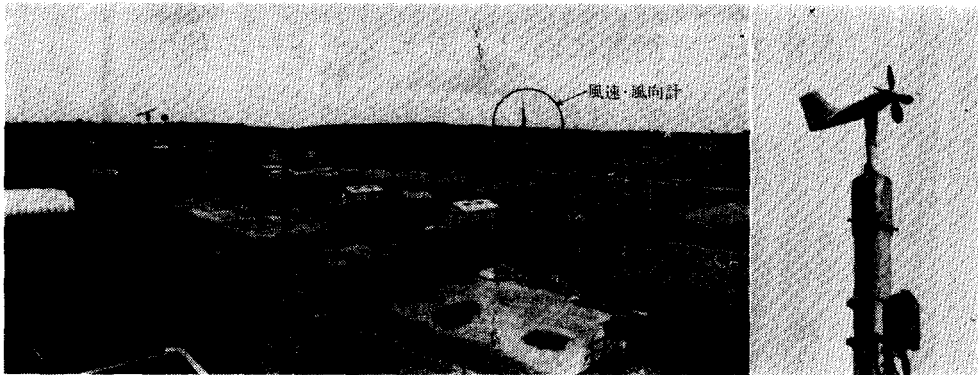


図-1 風速・風向計とその設置場所

培部のは場内で、地上10mの高さに設置した。現場は知多半島のほぼ中央部で、標高およそ45mの丘陵地であり、東側の衣浦湾までの直線距離約2km、西側の伊勢湾まで約4kmの地点である。風速・風向計の周辺には棟高3~4mの温室と管理棟が配置されており、西側へ向って緩傾斜したは場である(図-1)。

b 風速の測定

風速の階級別度数分布、風エネルギー特性等の解析に用いる平均風速は、エーロペン型風速計(コーシンペンKL-111型)を用いて測定した(図-1)。これは、風向検出部と一体になったもので、発信器は磁石式交流発電機(30V/2,500rpm)を用いている。起動風速は2m/s以下、耐最大瞬間風速は90m/sである。また、風速変動に対する応答性は、加速時(0-5m/s)の時定数1.5秒、減速時(5-0m/s)は3秒で、これは3杯型風速計の時定数の1/3程度である。

出力信号は0-30m/sを0-2.5mVとして、打点式自動平衡記録計(12点式、フルスケール0-10mV、打点間隔5秒、チャートスピード25mm/h)に1分間平均風速を連続記録した。

他方、風速の平年値は、当部の気象観測露場に設置した3杯型風速計で求めた値を用いた。これは、エーロペン型風速計の設置場所から約300m離れた所で、かつ、地上6mの高さに設置されている。このため、両風速計の値を比較する場合は、あらかじめ両者の関係を一次回帰式で表しておき、3杯型風速計の値を補正して用いた。

c 風向の測定

風向は、前記のエーロペン型風速計と一体になった風向計で測定した。出力は抵抗リング式発信器により、0

-540°を0-2.5mVとして風速用と同じ打点式自動平衡記録計に記録した。なお、電気的積分方式により、10分間連続平均として表示した。

d 風エネルギーの算出

エーロペン型風速計で測定した1分間平均風速から、風エネルギーを求めるには、次の計算式を用いた。すなわち、単位時間に単位断面積を通過する風エネルギー密度は、次式で表される。

$$E = \frac{1}{2} \rho A V^3 \times 9.8 \dots \dots \dots (1)$$

ただし、E:風エネルギー密度(W/m²h)、ρ:空気密度(kg・s²/m⁴)、A:風向に直角な面に投影される翼の回転断面積(m²)、V:風速(m/s)である。

(1)式から、1日当たりの風エネルギー(E_d)は、

$$E_d = \sum_{\text{day}} \frac{n}{60} \times 0.6125 V^3 (\text{kWh/m}^2 \cdot \text{日}) \dots (2)$$

として求められる。nは1m/s単位で分級した風速の各階級別度数を1日(9時から翌日の9時まで)について集計したもので、 $\frac{n}{60}$ は各風速の1日間の出現時間となる。

2 測定期間

風トピア計画は1978~1979年の2か年実施されたが、初年度は機器・装置の製作と設置、及び調整などのため12月から測定が開始された。このため、同計画としては、1979年だけの試験で終わったので、引き続き経常研究の中で測定を継続した。本報告には、そのうち、1979、1980年2か年の結果を取りまとめた。

期間中、計器の故障や点検のため、6日分データが得

られなかった。このため、この日の平均風速と風エネルギーは、気象観測露場における値を補正して補完した。

Ⅲ 結果及び考察

1 平均風速、及び風況曲線

a 平均風速の測定時間と間隔

従来、気象庁では、毎時に10分間の平均風速を測定し、これから日平均値を求めていた。最近はこのが1日8回に変っているが、このように、1日のうちで測定回数が変わった場合、日平均風速、及び日風エネルギーがどれ程相違するかを検討した。その結果の一例は図-2のとおりであった。図-2は、1978年8月と1980年1月について表したもので、この中の連続、24回、8回測定とは次のとおりである。

連続測定：1分間平均風速を連続測定して求めた1440個/日の平均

24回測定：毎時10分間ずつ、1分間平均風速を連続測定して求めた240個/日について平均したもの

8回測定：3時間おきに10分間ずつ、1分間平均風速を連続測定して求めた80個/日について平均したもの

連続測定により求めた日平均風速に対する24回、8回測定による日平均風速の比率を、月毎に平均すると、8月の場合は98.3、98.1%、1月の例では99.3、98.7%と

なり、月平均風速ではいずれの測定回数も大差がなかった。しかし、比率の月平均値の標準偏差は、8月が±5.1、±11.2%、1月は±6.1、±11.5%となり、測定回数が少なくなると偏差が大となった。また、日毎の比率についてみると、最大は8月が107、127%、1月は122、128%、最小は8月89、80%、1月86、68%となり、日によっては32%の差が生じる場合もあった。

一方、連続、24回、8回測定別に風速階級別度数分布を求め、これから1日当たり風エネルギーを算出したものについて、各測定回数間の比較を行った。その結果、1月の場合は、月合計値では24回、8回測定は、連続測定に対しそれぞれ98.2、97.7%という値を示し、その差は僅少であった。しかし、1日毎の比率の月平均値の標準偏差は、±13.2、±33.4%と大きく、8回測定では±95%という極めて大きな差を示す日があった。

同様な比較を年間について行った事例が報告されている(福岡管区気象台、1955)。すなわち、1日8回と24回の測定をそれぞれ基準とした風速の3乗値の年平均値は、その差が1%程度でほとんど等しい。このように、1日のうちの測定回数を異にしても、1月以上にわたる長期間平均値で見れば、その差はほとんど見られなくなる。しかし、一般的に、温室の環境制御における風エネルギーの利用は、日射の利用と同様日単位で設計と制御が行われることが多い。それには、日風エネルギーを正確に把握することが肝要であり、測定回数はできる限り多くすることが適切である。

一方、ある時間内の風程を測定し、これを測定時間で除して平均風速を求める方法が、一般的に用いられてい

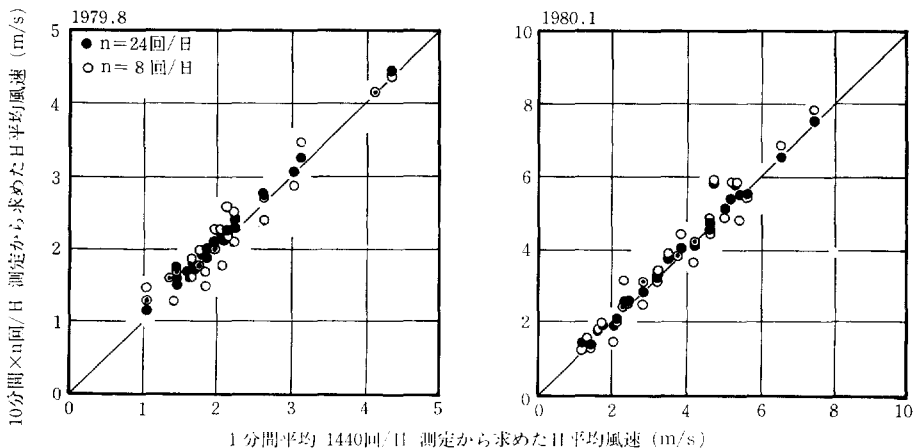


図-2 測定回数・時間を異にした場合の日平均風速

る。風エネルギーを算出する場合、この風程を求める最低単位時間も問題である。これは、測定時間内の風速の変動の大きさと関連するものであって、妥当な単位時間の決定には、風速変動の周期成分の解析結果が適用される。すなわち、周期が30秒から3分位の間で変動のエネルギーが極めて大きい (HOVEN, 1957) という例や、10秒～1分位の変動スペクトルが卓越する (花房, 1977) という事例がその論拠であり、これらのことから、最近では、1分間平均風速を最低単位とすることが望ましいと言われている。風トピア計画では、実施に先立っての検討の中で、これらを勘案して1分間平均風速を連続測定することに決定した。

b 半旬・月別、及び年平均風速

半旬・月別、及び年平均風速の測定結果は、表一1のとおりであった。月平均風速は、1979年は2、3月が共に3.7 m/s、1980年は12月が4.3 m/sで最大を示し、最小は、1979年6月と8月の2.1 m/s、1980年は8月の2.2 m/sであった。また、半旬別にみると、最大は、1979年は3月第1半旬の5.0 m/sと1980年12月第6半旬の5.8 m/s、最小は、1979年8月第1半旬の1.6 m/s、及び1980年7月第2半旬の1.3 m/sであった。なお、測定期間中、1日中無風という日は皆無であった。

年平均風速は、1979年が2.8 m/s、1980年は3.2 m/sで、累年平均 (1961～1979年) の年平均値3.1 m/sと比べると、1979年はやや小さかった。

各月間における日平均風速の変動の大きさを、変動係数 (cv) で表すと、2か年を通じ、概して10、11月のcvが大きく、6、8月は小さい傾向が見られた。

c 風速の階級別度数分布と風況曲線

月別に求めた風速の階級別出現頻度分布 (度数分布) は、図一3に表したとおりであった。なお、同図は1979年を主とし、1980年は1～3月のみを表した。これは、1979年の冬季間風速が平年に比べ小さかったのに対し、その他の月は2か年を通じ、ほぼ相似た分布を呈したからである。1979年は各月共、度数の最も大きいのは1 m/s以上2 m/s未満 (以下1～2 m/s) の風速で、低風速側にピークが出現する分布を示した。これに対し、1980年の1～3月は、1階級上の2～3 m/sが最も度数が大であった。すなわち、月平均風速が4 m/s以下の場合には、1～2 m/sの出現度数が最大となり、月平均値が4 m/s以上の場合には、これが1階級上位に移行する。

このような、平均風速と度数分布との関係を、日平均風速について見た結果は、図一4のとおりであった。平均風速の増大に伴って最大出現度数は高風速側に移動し、かつ、その分布は正規分布に近づく傾向が伺われた。

図一5は、年間 (1979年4月～1980年3月) における風速の度数分布と、この期間における日平均風速が3.0 m/sの日の度数分布 (10日間の平均) とを対比したものである。同図のように、平均風速は同じでも、度数が最大となる風速は、年間の方が1階級小さい。なお、1日

表一1 半旬別平均風速

単位 (m/s)

月	1979年									1980年									月平均 平年値		
	半旬						月平均	σ	cv	半旬						月平均	σ	cv			
	1	2	3	4	5	6				1	2	3	4	5	6						
1	2.7	1.6	4.3	3.4	2.9	3.9	3.1	1.34	0.432	2.5	3.4	4.4	4.1	4.0	3.6	3.7	1.64	0.443	4.0		
2	4.1	3.3	3.6	3.2	3.6	4.5	3.7	1.54	0.416	5.0	4.3	4.0	4.2	3.8	3.8	4.2	0.96	0.229	3.9		
3	5.0	2.7	4.2	3.2	3.8	3.6	3.7	1.72	0.465	3.3	4.8	4.8	3.2	3.9	4.2	4.0	1.50	0.376	3.9		
4	2.8	3.8	3.5	3.9	2.7	3.7	3.4	1.55	0.456	3.8	4.0	2.8	3.5	4.4	4.9	3.9	1.45	0.373	3.1		
5	2.5	3.6	4.8	2.1	2.1	3.3	3.1	1.26	0.406	3.5	4.3	2.8	3.0	3.3	3.1	3.3	1.29	0.392	3.0		
6	2.8	2.6	1.8	1.8	1.8	1.7	2.1	0.64	0.304	2.7	2.7	1.7	2.5	1.9	3.1	2.4	0.89	0.371	2.5		
7	2.5	2.1	2.8	2.4	1.8	1.9	2.2	0.80	0.364	2.6	1.3	3.2	2.5	1.6	3.0	2.4	1.04	0.435	2.4		
8	1.6	1.8	2.0	2.6	1.9	2.6	2.1	0.77	0.367	1.9	3.1	2.1	1.7	1.8	2.3	2.2	0.84	0.382	2.5		
9	3.3	2.6	2.0	2.3	2.2	2.7	2.5	1.03	0.412	2.5	2.9	3.2	1.9	2.1	2.1	2.4	1.41	0.585	2.5		
10	2.5	3.0	1.8	4.1	2.1	1.9	2.5	1.61	0.644	1.9	2.2	2.7	1.8	3.8	4.0	2.7	1.45	0.537	2.7		
11	2.0	2.7	4.4	2.6	1.9	2.6	2.7	1.38	0.511	2.5	2.0	3.0	1.6	2.4	3.1	2.4	1.28	0.533	3.3		
12	2.3	3.8	3.3	2.3	3.4	2.6	2.9	1.11	0.382	3.1	2.8	5.3	3.8	4.4	5.8	4.3	2.00	0.464	3.4		
平均							2.8										3.2				3.1

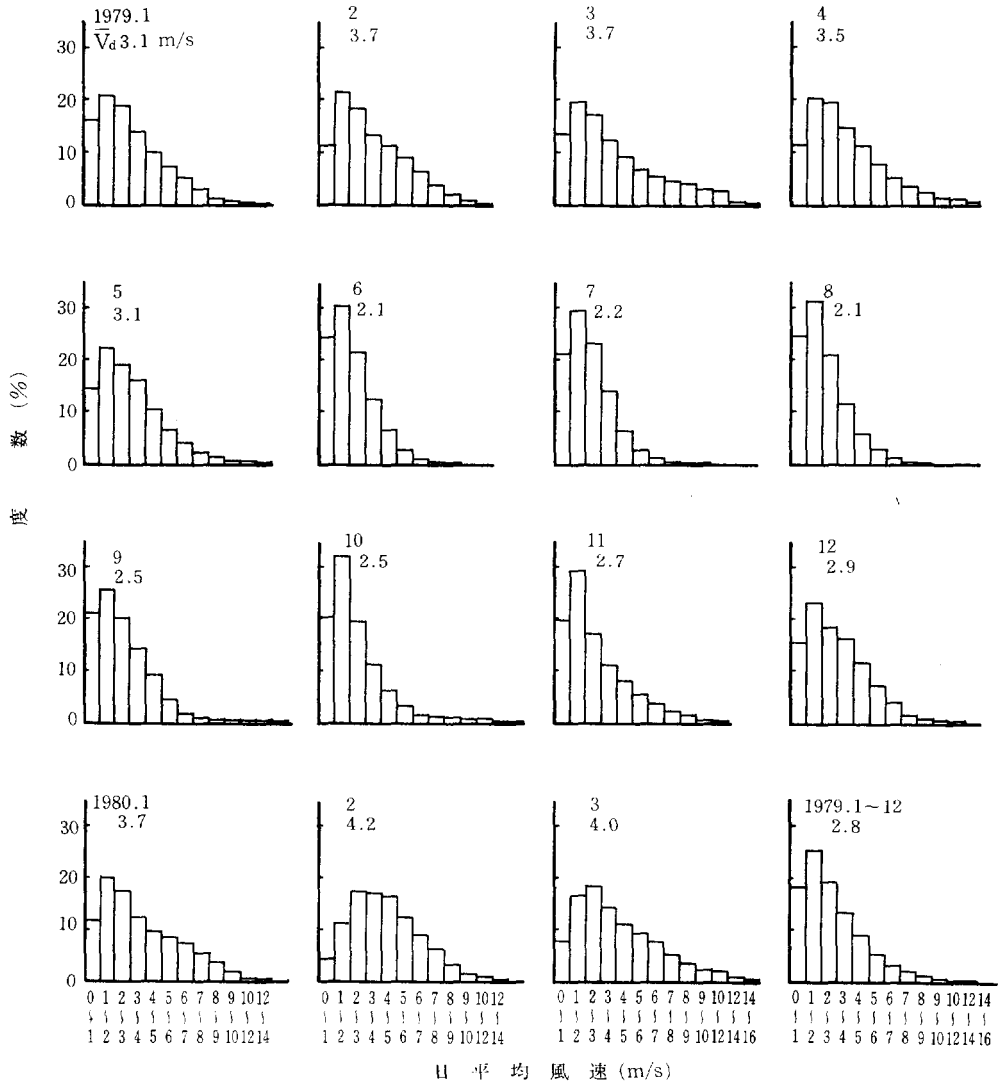


図-3 風速階級別度数分布
(1979.1~1980.3, 武豊)

間の度数分布には見られない9 m/s以上の階級に属する風速が、年間では全時間の1.7%現れている。比率としては小さいが、これに相当する風エネルギーは、年間の全風エネルギーに対し約27%と大きい割合を占めている。

以上のような風速の度数分布は、風エネルギーを算出する上で必要欠くことのできないものである。と同時に、風車を設計するに際して、耐風強度や風車の効率を決定する重要な要因でもある。風エネルギーの利用面からす

れば、平均風速の大きい方が好ましいが、平均風速の増大に伴って、例えば図-4に見られるように度数分布の幅が増大する場合は、これにマッチングした風車や、エネルギー変換装置（例えば発電機、熱変換装置など）の設計・開発に十分な留意が必要である。

ところで、風速の累積度数と風速との関係を表す曲線を風況曲線と呼んでいる。これは、ある期間、ある風速以上（又は以下）の風がどれだけの時間出現するかを知

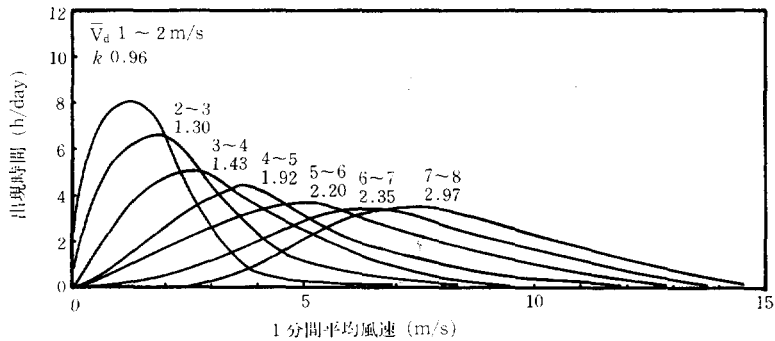


図-4 日平均風速 (\bar{V}_d) を異にした場合の風速階級別出現時間
 注・kはワイブル分布式の形状定数
 ・横軸の5, 10, 15はそれぞれ4~5, 9~10, 14~15を省略した

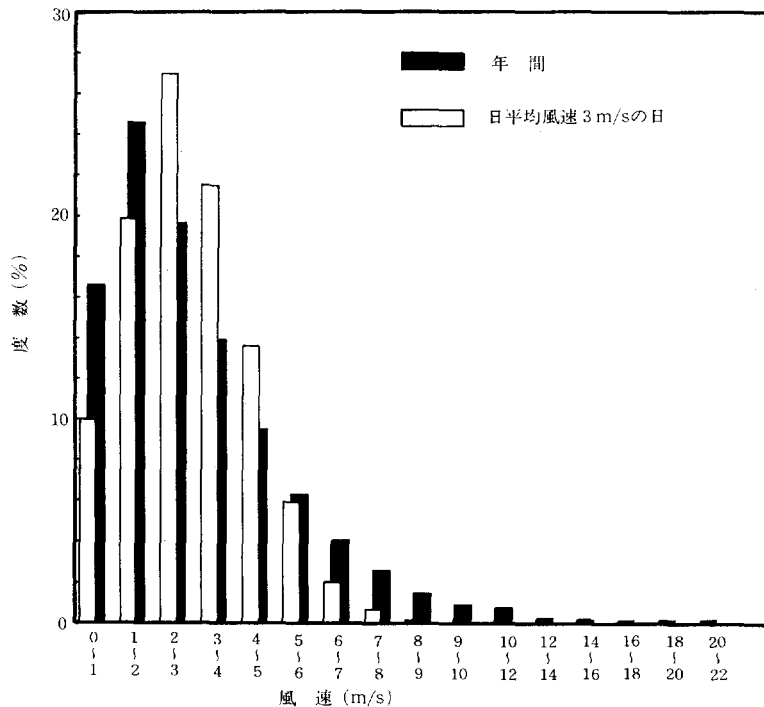


図-5 年間、及び日平均風速 3 m/s の日における風速階級別度数分布 (1979, 武豊)

るのに簡便な図である。度数分布から、各月、及び年について風況曲線を求め、そのうち、2か年を通覧して平均風速の大であった2月と、小さかった8月(いずれも1980年)、及び年間についてだけを図-6に表した。図から、風の強い1月に比べると、弱風の8月は曲線の平均曲率が大きいことが伺われる。この傾向は、我が国各

地の風況曲線を比較した結果の報告例(本間, 1979; 関ら, 1980; 科学技術庁資源調査所, 1980)でも明らかに見られ、平均風速が小となるに従って、曲線は双曲線に近い様相を呈してくる。

図-6から、年間、3.0m/s以上の風はおよそ56%、6 m/s以上は約15%出現したことが伺える。2月はこれ

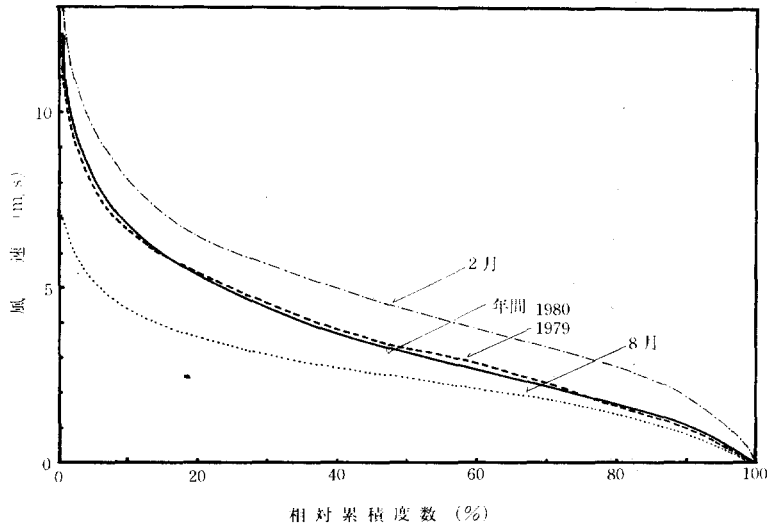


図-6 風況曲線

が77.27%に増大し、反対に8月は34.5%に減少した。このように、月別の差は大きかったが、年次別の差は小さく、ほぼ相似た風況を呈した。

なお、AMeDASのデータを利用して宮城県内6地点の風況曲線を求めた結果(科学技術庁資源調査所, 1980)のうち、8月について、平均風速が本試験の値(2.1 m/s)と等しい古川における風況曲線を見ると、3.0 m/s以上の風の月間累積出現時間は約22%、6 m/s以上は2%となっている。これらは、いずれも武豊における値より小さい。このことは、平均風速が等しくとも、風速の階級別度数分布が相違することを示唆するものといえよう。

d 風速度数分布の関数式

前項で述べた風速の度数分布(1979年)をワイブル分布(WEIBULL, 1951)により表した結果は、次のとおりであった。

$$f(V) = \frac{1.40}{3.25} \left(\frac{V}{3.25}\right)^{1.40-1} \cdot \exp \left\{ -\left(\frac{V}{3.25}\right)^{1.40} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 $f(V)$ は、風速 V の現れる確率密度関数である。また、3.25は尺度定数(c)と呼ばれるもので、風速の相対累積度数が63.2%になるところの V の値に等しい。これは、ワイブル確率紙を用いて求められる。また、1.40は形状定数(k)と呼ばれるもので、 $V=1$ m/sに相当する相対累積度数を読み取り、次式を用いて算出した。

$$k = -\ln\{-\ln[1 - F(V \leq V_x)]\} / \ln c \dots\dots\dots (4)$$

なお、月別に k の値を求め比較した結果、6, 7, 8月の3か月を平均した k の値に対し、1, 2, 3月の3か月の平均値は約12%大きい値を示した。これは、6~8月は、1~3月に比べ c の値が小さく、反対に、 $V=1$ m/sに相当する累積度数が大きかったことからすれば当然のことと言えよう。更に、日平均風速を異にした場合の k を算出した結果は、図-4に表したとおりであった。平均風速の増大に伴って k の値も大となり、0.96から2.92の範囲で変化した。

(3)式の定数 c と k を用いると、次式から年平均風速が求められる。

$$\bar{V}_y = c \Gamma(1 + 1/k) \dots\dots\dots (5)$$

ただし、 \bar{V}_y :年平均風速(m/s)、 Γ :ガンマ関数。
(5)式により求めた1979年4月~1980年3月の間の年平均風速は2.96 m/sとなり、これは、実測値の2.95 m/sとよく一致した。

2 風エネルギー

a 風エネルギーの賦存量

風エネルギーの月合計及び年合計値は、表-2に表したとおりであった。年合計値は、1979年は394 kWh/m²年(338,840 kcal/m²年)、1980年は513 kWh/m²年(441,180 kcal/m²年)で、前者の値を1/4乗則で高度

表一 月別風エネルギー・日射量

単位 (kWh/m²)

月	風エネルギー		1979年 日射量		総エネルギー		風エネルギー		1980年 日射量		総エネルギー	
	月合計値	月間cv	月合計値	月間cv	月合計値	月間cv	月合計値	月間cv	月合計値	月間cv	月合計値	月間cv
1	39.8	1.04	70.6	0.32	110.4	0.40	61.1	0.98	69.8	0.40	130.9	0.53
2	45.5	0.91	76.2	0.36	121.7	0.40	58.7	0.56	106.2	0.23	164.9	0.26
3	73.2	0.96	101.9	0.55	175.1	0.50	77.7	0.92	120.6	0.49	198.3	0.49
4	48.1	1.17	119.9	0.53	168.0	0.50	57.1	0.81	132.7	0.48	189.8	0.39
5	38.5	1.29	167.1	0.40	205.6	0.34	45.1	1.18	151.5	0.50	196.6	0.48
6	10.5	1.07	141.9	0.46	152.4	0.46	15.9	0.97	125.7	0.41	141.6	0.38
7	13.7	1.22	142.8	0.38	156.5	0.34	20.3	1.14	128.7	0.51	149.0	0.49
8	12.0	1.07	149.3	0.28	161.3	0.25	12.0	0.99	114.5	0.45	126.5	0.44
9	22.9	1.63	102.7	0.48	125.6	0.47	22.7	1.93	104.5	0.54	127.2	0.54
10	34.2	2.48	98.4	0.42	132.6	0.61	32.3	1.48	81.8	0.54	114.1	0.51
11	29.5	1.18	62.2	0.50	91.7	0.56	26.4	1.40	69.6	0.40	96.0	0.51
12	26.5	0.78	68.3	0.35	94.8	0.36	84.1	1.21	75.0	0.28	159.1	0.67
合計	394.4		130.3		1695.7		513.4		1280.6		1794.0	
平均		1.23		0.42		0.43		1.13		0.44		0.47

補正して100mの高さにおける値に換算すると、約1,200 kWh/m²年となる。これを我が国の風エネルギー分布図(草野, 1979)と照合すると、5段階に分級された全国風エネルギーのほぼ中位に相当する。最大は10,000 kWh/m²年以上とされているので、この点からみれば、武豊は必ずしも風エネルギー利用の最適地とは言いがたい。しかし、5,000 kWh/m²年以上の風エネルギーが得られる地点は、その多くが山上、岬、あるいは島しょに分布しており、立地条件からは利用上難点が多いと考えられる。

月別の風エネルギーは、1979年は3月、1980年は12月が最大を示し、それぞれ73.2 kWh/m²月(62,952 kcal/m²月)、84.1 kWh/m²月(72,326 kcal/m²月)であった。1980年は月平均風速の最大月と一致したが、1979年は2月、3月ともに月平均風速は3.2 m/sと等しかったにもかかわらず、風エネルギーは45.5 (39,130)と73.2 (62,952) kWh/m²月(kcal/m²月)と大きく相違した。これは、風速の度数分布が異なったためである。

各月毎に、1日当たり風エネルギー(日風エネルギー)の変動の大きさをcvで表して比較すると、2か年を通覧して変動の最も大きかったのは9、10月で、cvは1.93という大きい値を示した。これは、主として台風の影響によるものと考えられる。反対に、cvが小さかったのは1979年12月の0.78、1980年2月の0.56であった。又、年間におけるcvは、1979年が1.23、1980年は1.13

であった(表一)。1967年から1977年までの11年間における、我が国157の気象官署の測風塔で観測された風速の記録から求めた風の平均パワー(w/m²)のcvは、157か所平均で2.56という値となることが報じられている(光田ら, 1979)。本試験の測定期間とは異なるので同律には比較できないが、風エネルギーの変動が大きいかを示唆するものといえよう。

自然エネルギーのうち、温室で利用されることの多い日射量と比較すると、1979年の風エネルギー年合計値は日射量の約30%、1980年は約40%に相当した。しかし、12~3月の冬季4か月間の月合計値では、その比は約59、76%となった。反対に、5~8月の夏季4か月間は約12、18%と小さい値を示した。また、日積算日射量の月間のcvは0.23~0.54の範囲内にあり、年間では0.38(1979年)、0.44(1980年)であった。これに比べると風エネルギーのcvは、約3倍という大きい変動を示した。

一般に、自然エネルギーはその密度が小さいのが特徴と言われている。その中でも風エネルギーは密度が小さく、武豊においては、日射量の30~40%(年合計値)しか得られなかった。加えて、変動の大きさは日射量のその3倍に及ぶという特性が明らかになった。有効利用を図る上での大きな難点であるが、両者の年変化の特性を考慮すれば、その複合利用によって相補うことが可能と考えられる。

b 日風エネルギーと日平均風速との関係及びキュービック因子

風エネルギーを風速の度数分布や風況曲線から求めるのは相当に複雑である。これを日平均風速から直接求めることができれば、その計算は著しく簡便化される。このようなことから、日平均風速 (\bar{V}_d) と日風エネルギー (E_d) との関係を検討した。その結果は、図-7 に表したとおりで、両者を対数目盛りで表すと、直線関係にあることが認められ、次式によって近似することができた。

$$E_d = 0.0345 \bar{V}_d^{2.815} \text{ (kWh/m}^2\text{日)} \dots\dots (6)$$

なお、同図には、横軸に記した各風速が1日中定常的に出現したと仮定した場合の日風エネルギー (\bar{E}_d) と日平均風速との関係を(7)式により算出して、破線で表した。

$$E_d = 0.0147 \bar{V}_d^3 \text{ (kWh/m}^2\text{日)} \dots\dots (7)$$

これに対し、実線で表した実際の風エネルギーは、いずれの点も破線を上回わり、 $E_d > \bar{E}_d$ という関係が認められた。

ところで、ある期間について時々刻々(本試験では1分間ごと)の風速の3乗値から求めた \bar{V}^3 値と、その期間の平均風速の3乗値(\bar{V})³との間には、次式のような関係がある。

$$f_c = \bar{V}^3 / (\bar{V})^3 \dots\dots\dots (8)$$

そうして、 f_c はキュービック因子と呼ばれている。図

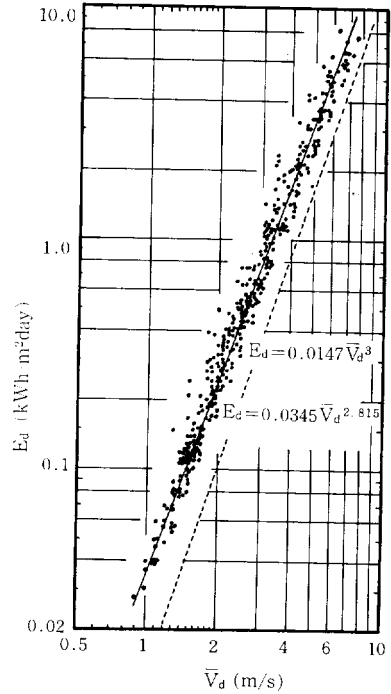


図-7 日平均風速 \bar{V}_d と日風エネルギー E_d との関係

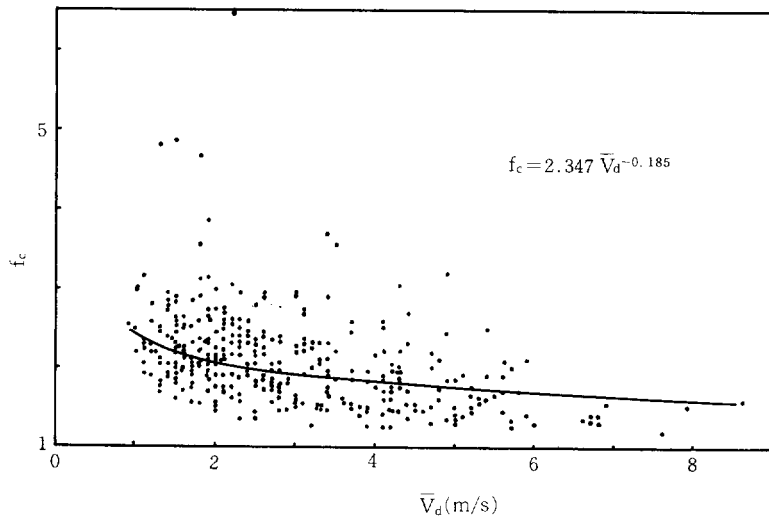


図-8 日平均風速(\bar{V}_d)とキュービック因子(f_c)との関係

—8は、この f_e と日平均風速との関係を表したものである。同図から、低風速域では f_e の変動幅が大きく、 \bar{V}_d が2 m/sでは1.4から6.5までの範囲に分布していることが伺える。しかし、高風速域では分布の幅は狭くなり、8 m/s以上ではおよそ1.5に近づく。全体的な傾向として、 f_e は \bar{V}_d の増大に伴って小さくなる傾向が認められ、これは、次式で近似することができた。

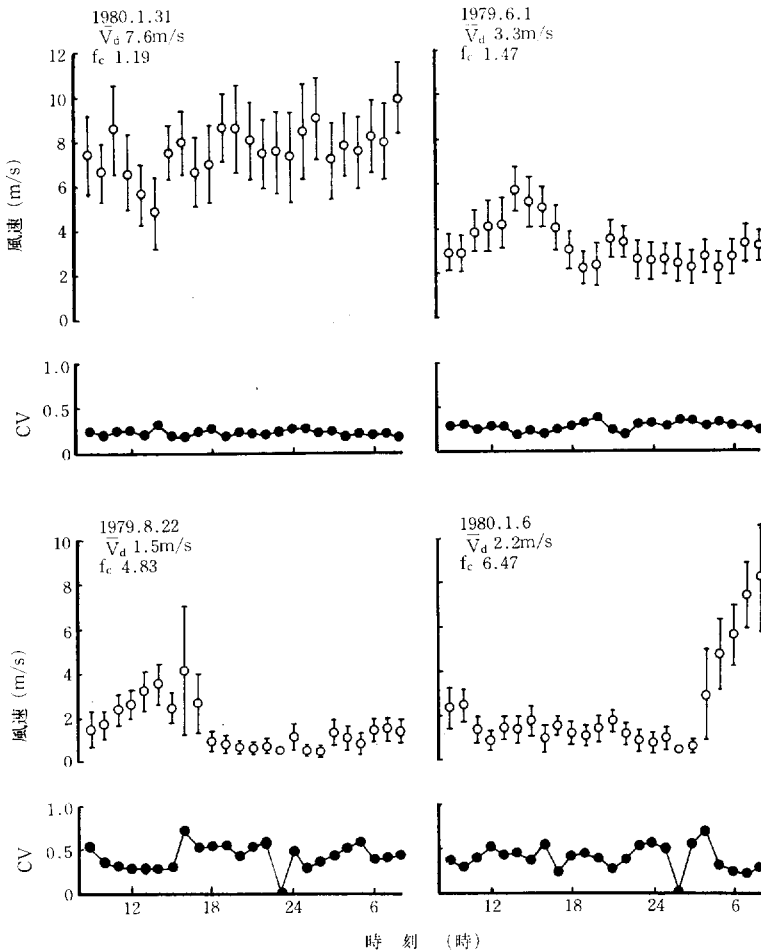
$$f_e = 2.347\bar{V}_d^{-0.185} \dots \dots \dots (9)$$

ちなみに、 f_e を月単位に求めて年間について平均すると2.93という値が得られた。また、6、7、8月の平均が2.75となったのに対し、1、2、3月の平均は2.41と、平均風速の大きい月の方が小さい値を示した。更に、

年単位では3.15となり、平均風速を算出する期間が長くなるに従って、 f_e は大となった。

なお、図—8において f_e が5~6という大きい値を示したのは、日平均風速としては2 m/sと比較的低い風速ではあるけれども、1日のうちの短時間、突風のような強風が出現した日においてであった。すなわち、1日のうちの風速変動が大きい場合は f_e が大となり、反対に、1日のうちの風速変動が小さい場合は f_e も小さくなった。その一例は、図—9に表したとおりである。

以上のように、 f_e を用いることによって、 \bar{V}_d からおよそその日風エネルギーを推計することはできるが、武豊において最も出現頻度の大きい2~3 m/s前後の日平均風速域では、 f_e の変動幅が大きいので、正確な日風エ



図—9 f_e 値を異にする日の風速の時刻別変化

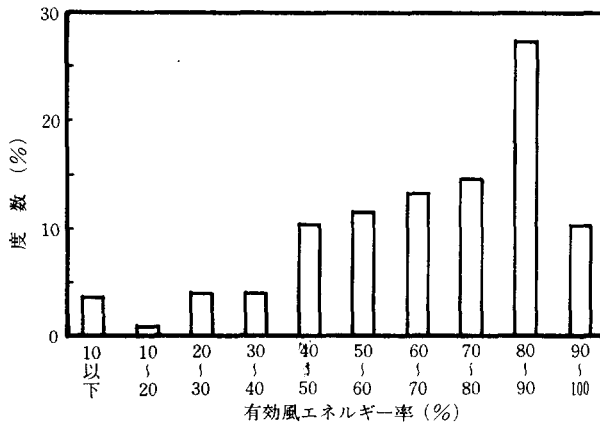
エネルギーを求めるのは問題である。

c 有効風エネルギー

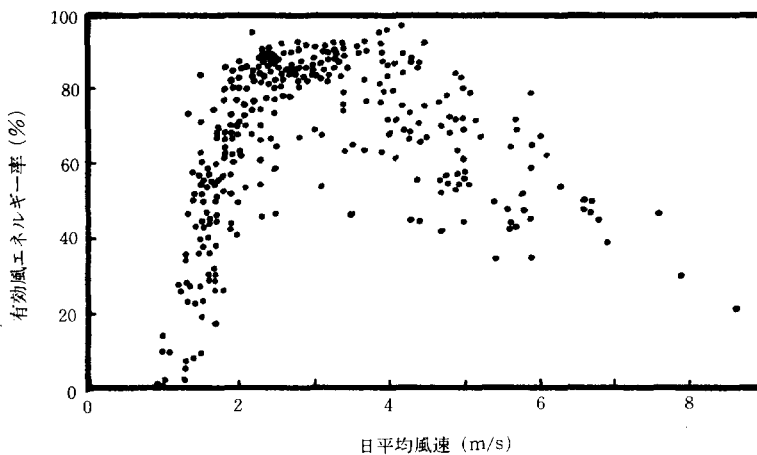
風車を用いて、風エネルギーを利用目的に応じた形に変換する場合、装置の種類やその特性によって風エネルギーの利用可能な範囲が制限される。このような、全風エネルギーのうち、風車によって利用し得る風エネルギーの割合を有効風エネルギー率と呼ぶことにする。

本試験に用いた3種類の風車のうち、水平軸プロペラ型のF風車を例にとると、風車の回転始動風速は、1 m/s以下の低風速であるが、これに組み込まれた発電機の発電開始風速は、3 m/sに規制されている。したがって、3 m/s以上の風速が有効となる。一方、強風に対する風

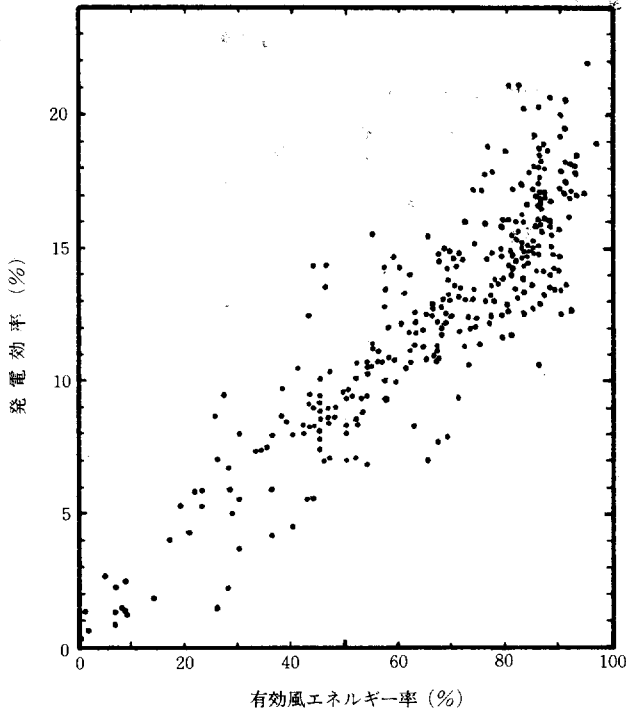
車の安全対策上、ある一定の風速以上になると翼の回転増加を制限する機構が備えられている。F風車は、これを翼のピッチを変更することによって調整しており、9 m/s以上の風速では回転が定速となる。しかし、発電機の負荷特性はこれより低風速の6 m/sで定格となるので、F風車が利用できる風速域は3 m/s以上であって、6 m/sを超える風速域でも6 m/sと同等の風エネルギーしか利用できない。このような装置の特性を勘案して、有効風エネルギー率を求めた。その結果、年間の有効風エネルギー率は、1979年67.1%、1980年66.1%と、兩年ほぼ等しい値が得られた。また、日単位で求めた有効風エネルギー率の階級別出現割合は、図一10に表したとお



図一10 年間有効風エネルギー率階級別度数分布



図一11 日平均風速と有効風エネルギー率との関係



図一12 有効風エネルギー率と発電効率との関係

りであり、80%以上の有効風エネルギー率を示す日は、年間およそ135日しか見られなかった。

一方、日単位の有効風エネルギー率と \bar{V}_d との関係をみた結果は、図一11のとおりであった。有効風エネルギー率は、 \bar{V}_d が3~4m/s附近でほぼ最大となっていることが伺える。これは、当初、風車を設計するに当たって、武豊における年平均風速の平年値3.1m/sを基準としたためである。しかし、設計の段階で風速の階級別度数分布で表されるような、風速の変動性までは盛り込めなかったため、 \bar{V}_d が4m/s以上の日には有効風エネルギー率が急激に低下する結果となった。

風車を用いた風エネルギーの電力への変換効率については、次報で詳細に報告する予定であるが、発電効率は図一12に表したように、有効風エネルギー率の大小と極めて密接な関係のあることが認められた($r=0.819$)。風車による発電の効率の限度とされている30~40%には至らなかったが、有効風エネルギー率が100%に近い領域では、約22%という発電効率が得られた日もあった。今後の風車の改良に当たっては、平均風速と同時に、その変動性も加味した装置の設計が重要である。

3 風向の変動特性

a 風配図

風車を設置する場所を選定するに当たって、風向変動のなるべく少ない所という条件が挙げられる。これは、急激な風向変動に対する風車の追従性の良否と関係し、風車の破損防止対策上や、風向に相対する翼の受風面積の減少防止の面から重要である。

月別に表した8方位別相対風向出現度数(風配図)は、図一13のとおりであった。これも、風速と同様、1分間ごとに測定した風向を集計したものである。これによると、12~3月の間は北西の風が卓越し、次いで、北、及び西の風が多かった。これに対し、東、南の風はほとんど現れなかった。4、5月も北西の風の出現割合が大であったが、このころになると、反対の南東の風も出現するようになった。6~9月は、反対に南東の風、及び南の風が卓越したが、北西ないし北の風も屢々現れた。10、11月は共によく似たパターンを示し、北又は北西の風が多く出現した。

このような、月別主風向出現の傾向と月平均風速との

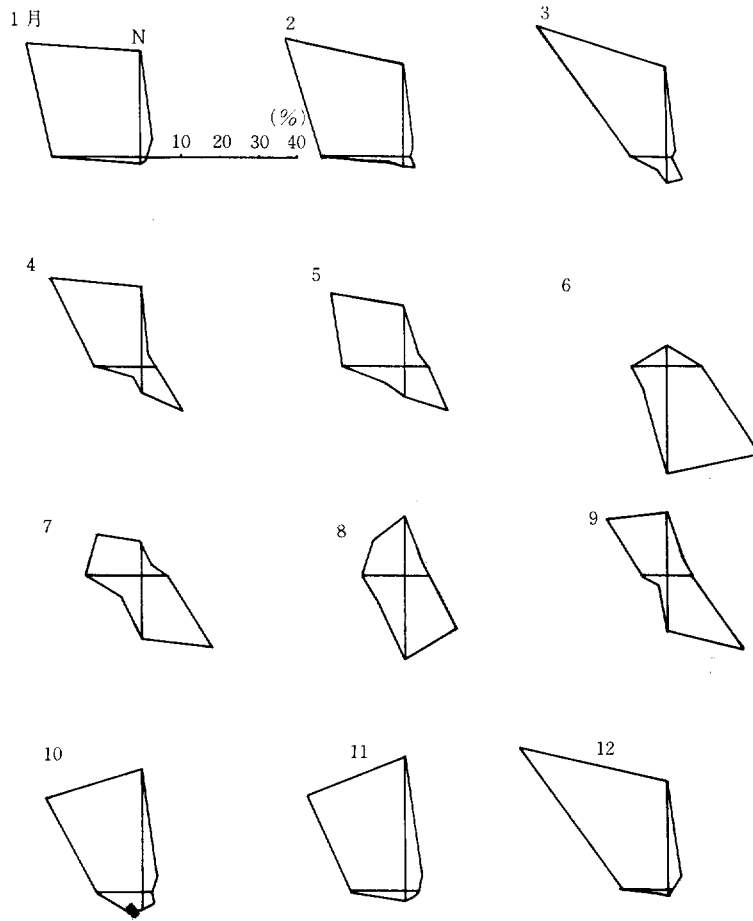


図-13 月別風配図

関係をみると、北西の季節風が卓越する1～5月の間は、月平均風速が3 m/s以上であり、反対に、南東風が卓越する6～8月は、2 m/sを僅かに超える程度であった。

b 風向の日変化

1日のうちで風向が変化する大きさを角度で表し、これを月ごとに平均した結果は図-14のとおりであった。1日のうちの風向変化は12月が最も小さく、8月が極めて大となる傾向が顕著に見られた。このうち、変化が270°に及ぶ8月について、図-13に見られた主風向、すなわち、北西と南東の風が1日のうちでどの時刻に現れるかを見た結果は、図-15のとおりであった。なお、同図は、各時刻別に、それぞれの風向が現れる日数でもって、出現頻度の大小を表している。これによると、11時か

ら23時の間は南東の風、すなわち海風が多くみられ、1～10時の間は反対の北東風（陸風）の出現する日が多かった。武豊は、東、西、南を海に囲まれた細長い知多半島のほぼ中央に位置しているが、このような海・陸風の交替が明瞭に認められる。この傾向は、7、9月もほぼ同様に見られたが、海・陸風交替時刻は8月に比べると、やや不明瞭であった。

以上は、比較的長い周期での風向変動について検討したものである。しかし、風車の強度保持、あるいはエネルギー変換効率の面からは、更に短い、例えば1分以内の風向変動を明らかにする必要がある。これは観察であるが、風向変動に対するF風車の追従性が10数秒のオーダーであったことから推察される。しかし、本試験に用いた風向計ではその解析が不能であり、また、風車翼

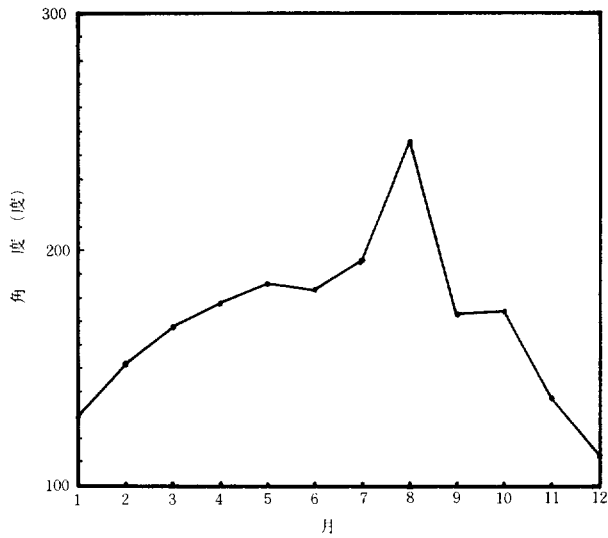


図-14 1日の間における風向変動角度

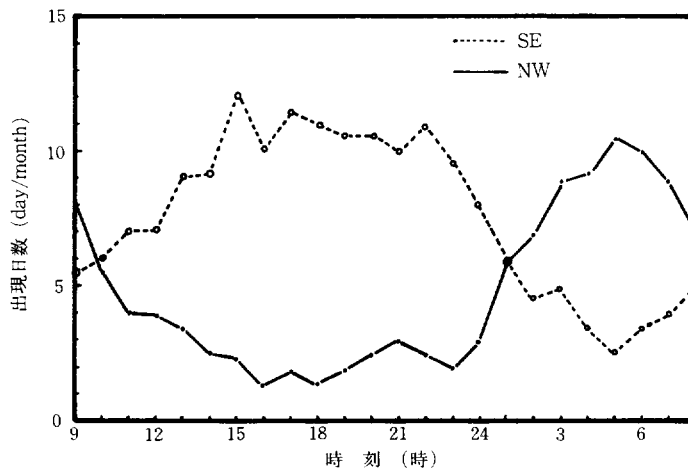


図-15 時刻別卓越風の風向出現日数 (1779.8)

自身の方向変動を記録する装置も備えられていなかった。これらは、今後に残された問題である。

Ⅳ 総合考察

風エネルギー資源の調査は、最近、農林水産省のグリーンエネルギー計画の中で広範囲に進められ、その1979年度の報告書が刊行されている。この中で、青森、秋田県内それぞれ21、23地点のデータが紹介されている。また、

風速、あるいは風エネルギーは、地形の影響を受けて複雑な地勢的分布を示すことから、小峯ら(1980)は、メッシュデータを用いた地形因子解析法により、気象観測が行われていない任意の地点の風速を推定した結果を報じている。この方法で得られた回帰式の重相関係数は、0.70~0.86であり、風が強い冬季には係数が高く、反対に、風が弱い夏季には平均風速の回帰式の重相関係数が低く、風速をより精度よく推定するためには、従来考えられていた因子よりかなり近くの地形を詳細にとら

える必要があると述べている。

本試験において、武豊の、ほぼ均一に開けたほ場内に、基準風速計を中心としてほぼ正三角形(1辺約50m)の頂点に3基の風車を設置し、これと同じ場所で風速を測定した。これは、1979年12月～1980年3月の間だけの測定結果であるが、風エネルギーに換算した場合、各位置の間で約30%の差が見られることがあった。今後、風車利用を計画する場合は、その場所についての風況の綿密な事前調査が必要であろう。

その内容は、①風エネルギー量、②風況曲線、③平均風速、④弱風の継続時間、⑤風エネルギーの日変化パターン、及び⑥風向別風エネルギー等についての季節変化を明らかにすることである。本試験では、これらのうち、①～③について解析した。④～⑥についてもデータは得られており、解析を続ける計画である。

風エネルギー算出の基礎となるのは、風速の階級別度数分布、あるいは風況曲線である。これらの関数形としては、ワイブル分布、オルソン分布のほか、ポアソン分布やピアソンⅢ型分布等が適用される。KATOら(1979)は、これらのうち、次のオルソン分布を用いて、我が国の年平均風速(\bar{V}_y)5m/sの地点について、風況曲線の定式化を試みている。

$$H = 8760 \exp \left[-\frac{\pi}{\alpha} \left(\frac{V}{V_y} \right)^\beta \right] \dots \dots \dots (10)$$

ただし、H：年間に風速(V)以上の出現する累積時間数である。 α 、 β としてKATOらはそれぞれ4.06、2.06という値を得ている。このうち、 β は、ワイブル分布のkと類似の意味を持つ定数で、武豊の風況曲線(1979年)を(10)式で定式化した結果、 $\beta = 1.34$ という値が求められた。

しかし、本試験では、ワイブル分布を用いて解析した。その理由の一つは、風速と相対累積度数との関係をワイブル確率紙上にプロットすると、ほとんど一直線上に各点が並んだことから、同分布による定式化が適切であると判定されたためである。更に、ワイブル分布の適用は、JUSTUSら(1976)、HENNESSY(1976)、光田ら(1979)等が試みており、また、グリーンエナージ計画(1980)の中での風エネルギーの解析に用いられている。このようなことから、その形状定数kの値をそれらの結果と比較検討しようとしたことも理由の一つである。

このkの値は、年平均風速の大きい地点ほど大きく、本間(1979)によると、我が国ではおよそ0.8～2.2の範囲に分布するとされている。また、光田ら(1979)が全国157の気象官署における1967～1977年間の平均値を

算出した結果によると、0.99から2.06の範囲となっている。ちなみに、米国のボストンでは2.38という値が得られている(FROSTら、1978)。本試験で得られた年単位のk1.40に相当する平均風速は、本間(1979)の報告では2.8m/sとなっており、これは、1979年の武豊の年平均風速と同じであった。

一方、本間は、キュービック因子 f_c とkとの間には反比例の関係があるというMCVEIGH(1977)の事例を紹介している。すなわち、kの増大に伴って f_c は指数曲線的に低下する。本試験において、6～8月と1～3月の平均 f_c とkとが反比例の関係を示したことは、これと類似の傾向である。つまり、ここに、風速の増大→kの増大→ f_c の低下という関係が認められる。 f_c が日平均風速の増大に伴って指数曲線的に低下したこと(図-8)も、この一連の関係を説明されよう。

風速、あるいはkの増大に伴って f_c が低下する理由の一つとして、風速の階級別度数分布型の相違が関係することが推察される。図-4において、日平均風速が増大するに伴ってkの値も大となり、同時に度数分布が正規分布に近づくことが認められた。すなわち、度数分布型が正規分布に近い程 f_c は小さくなり、1に接近することができよう。kの値が3.0(光田ら、1979)、あるいは3.3(本間、1979)くらいどき度数分布は正規分布型に近くなると言われており、我が国でkがこの値を示すのは、年平均風速が10m/s以上の地点である。武豊の年平均風速からすれば、これには程遠いが、日平均風速でみた場合には、8m/s以上で正規分布型に極めて近くなると推察される。しかし、この日平均風速以上が年間に出現する相対度数は、約5%程度と極めて小さかった。

いずれにせよ、 f_c は、同じ日平均風速の日でも大きい分布幅を示し、特に低風速域の日の分布幅が大であった。このことから、日平均風速と f_c により日風エネルギーを推計することは、極めて大きな誤差を生じる結果となるであろう。この点は、風エネルギーの日変化のパターンを解析するなどして、更に検討を進めることが肝要である。

なお、温室の環境制御、特に暖房に日射などの自然エネルギーを利用する場合、通常は1～2日間のエネルギー収支を基にして設備等が設計されることが多い。このことから、風エネルギーについても、日々の変動特性を明らかにすることが必要である。その一法として、風エネルギー変動周期のスペクトル解析が適用できよう。図-16は、その試算結果を表したものである。解析に用

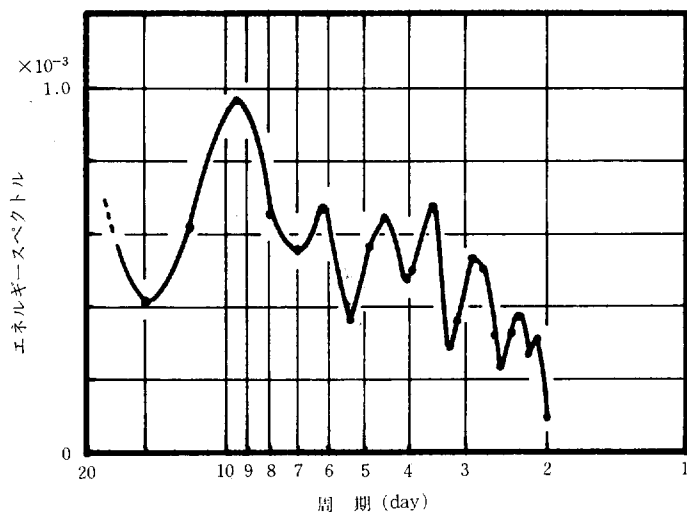


図-16 風エネルギーの変動スペクトル (1979.1~1980.5, 武豊)

いた標本数が512日と僅少であったため、30日を超える長周期の成分については信頼性が乏しかったので、これは図から省略した。これによると、9.4日周期のところやや大きなピークがあり、それ以下、6.1, 4.5, 3.5, 2.7日周期のところにも小さなピークが見られた。これらについては、更に長期間の測定を行って、正確を期すことが必要である。

自然エネルギーは変動性の大きいことが特徴の一つであり、これに加えて、温室における暖房負荷も非定常である。両者の特性を合理的にマッチングさせることが、装置の設計、あるいは制御法策定上、重要である。

V 摘 要

風エネルギーを利用した温室の環境制御システムを開発するに当たって、愛知県武豊における風況特性、風エネルギー賦存量とその変動特性を明らかにした。

1) 1分間平均風速を連続測定して求めた月平均風速は、1979年は2, 3月が3.7 m/s, 1980年は12月が4.3 m/sで最大を示し、1979年は6, 8月が2.1 m/s, 1980年は8月が2.2 m/sと最小となり、冬季に大、夏季に小という年変化を示した。年間平均風速は1979年が2.8 m/s, 1980年は3.2 m/sであった。

2) 風速の階級別度数分布は、年間について見ると1~2 m/s, 1~3月は2~3 m/sの所にピークのあるワイブル分布を示した。また、日平均風速の度数分布は、

風速の増大に伴って、正規分布型に近づいた。

3) ワイブル分布における尺度定数 c 、及び形状定数 k の値は、1979年の年間では、3.25, 1.40となった。このうち、 k の値は、平均風速の増大に伴って大となった。

4) 風速の度数分布から算定した風エネルギーの年間合計は、1979年は394 kWh/m²年, 1980年は513 kWh/m²年であった。月別には、1979年は3月, 1980年は12月が最大を示し、それぞれ73.2, 84.1 kWh/m²月であった。同期間の日射量に対する風エネルギーの比率は、年間では、1979年が30.3%, 1980年は40.1%, 12~3月の冬季は58.6, 75.7%, また、5~8月の夏季は12.4, 17.9%に相当した。

日風エネルギーの年間における変動の大きさを変動係数で表すと、1979年は1.23, 1980年は1.13となった。これは日射量のその約3倍という大きな値であった。

5) キュービック因子 f_c は、年単位では3.15, 月単位の値の年平均では2.93となった。また、日単位では1.4から6.5までの範囲に分布し、低風速域で特にその変異の幅が大であった。なお、日単位で求めた f_c は日平均風速の増大に伴って指数曲線的に小さくなり、8 m/s以上ではおよそ1.5に近い値となった。

6) 全風エネルギーのうち、風車によって電力に変換することのできる風エネルギーの割合、すなわち、有効風エネルギー率を、試験に供したF風車について求めた結果、1979年が67.1%, 1980年が66.1%となり、両年

共ほぼ等しい値が求められた。

風車を介した風エネルギーの電力への変換効率、有効風エネルギー率と極めて高い正の相関関係のあることが認められた。

7) 8方位別に表した風向の各方位別出現割合は、12~3月は北西風が卓越した。4~5月も北西風の出現割合が大であったが、南東風も出現した。6~9月は、反対に南東風、及び南の風が卓越したが、北西風、ないし北の風もしばしば現れた。10、11月は北又は北西風が多く出現した。

8) 1日のうちで風向の変化する角度は、8月が270°と極めて大きく、12月が120°で最小となる年変化を示した。

引用文献

- 1) AZUMA, A., K. KAWACHI (1979): Local Momentum Theory and its Application to the Rotary Wing. *J. Aircraft*, **16**(1), 6~14.
- 2) FROST, W., B. H. LONG & R. E. TURNER (1978): Engineering handbook on the atmospheric environmental guideline for use in wind turbine generator development. NASA Tech. Paper, 1359.
- 3) 花房竜男 (1977): スペクトル解析の方法と気象要素のスペクトル. 気象研究ノート, **131**, 1~60.
- 4) HENNESSY, J. P. Jr. (1976): Some aspects of wind power statics. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 119~128.
- 5) 本間琢也 (1979): 風力エネルギー読本. pp. 1~2, pp. 120~130, オーム社, 東京.
- 6) JUSTUS, C. G., W. R. HARGRAVES & A. YALCIN (1976):

- Nationalwide assessment of potential output from wind powered generators. *J. Appl. Meteorol.*, **15**, 673~678.
- 7) KATO, Y., K. SEKI & Y. SHIMIZU (1979): Modeling of Annual Energy Output of Wind Turbine System. 東海大・フタバスト工科大合同シンポジウム論文集, pp.1~6.
 - 8) 喜多康雄 (1978): 北風暖房. 技術と経済, **5**, 62~70.
 - 9) 小峯裕己・村上周三・柴田裕司・松野信雄 (1980): モーシユデータを用いた地形因子解析法による任意の地点の平均風速の推定方法に関する研究. 天気, **27**, 849~861.
 - 10) 草野和夫 (1979): 日本における風エネルギーの賦存量. 風エネルギーに関するシンポジウム資料, pp.55~59. 日本風力エネルギー協会.
 - 11) 光田 寧・林 泰 (1979): 日本における風エネルギーの評価. 天気, **26**, 583~594.
 - 12) 関 和希・清水良夫・加藤愛雄 (1980): 風エネルギー利用と変換に関する研究. 風エネルギー利用によるケース・スタディと地域都市計画のためのコミュニティ・エネルギー. 東海大産業科学研究所報, **11**, 5~9.
 - 13) 牛山 泉 (1979): 海外における風エネルギー開発の動向. 風エネルギー利用に関するシンポジウム資料, pp.17~22. 日本風力エネルギー協会.
 - 14) WEIBULL, W. (1951): A statistical distribution function of wide applicability. *J. Appl. Mech.*, **18**, 293~297.
 - 15) VAN de HOVEN (1957): Power Spectrum of Horizontal Wind Speed in the Frequency Range from 0.007 to 900 Cycles. *J. Meteorol.*, **14**, 160.
 - 16) 福岡管区気象台 (1955): 風力発電と気象(その1). 気象庁産業気象調査報告, **19**(1), 51~70.
 - 17) 科学技術庁資源調査所 (1980): 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, **74**, 3~54.
 - 18) 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委員会 (1980): 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. pp.19~23.

Utilization of Wind Energy for Control of Greenhouse Environment

I Wind Regime at the Taketoyo Experiment Station

Yasuo NAITO

Summary

Measurements of wind velocity and wind direction were made during the years 1979 and 1980 at the Taketoyo Experiment Station in Aichi Prefecture. Wind data were analyzed to determine the characteristics of wind energy from the standpoint of the utilization of wind force for control of green-house environment. The results so far obtained can be summarized as follows.

1. Annual mean of wind velocity was found to be 2.8 and 3.2 m/s in 1979 and 1980, respectively. Annual total wind energy calculated from Eq (1) varied from 394 kWh/m² in 1979 to 513 kWh/m² in 1980. Annual pattern of monthly mean of wind velocity and monthly total wind energy corresponded to a curve with distinct maximum in the period from winter to spring.

2. Frequency distribution curve [f(V)] of wind velocity was found to be affected by the mean wind velocity, and to be well approximated by the following Weibull's equation.

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{k-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right]$$

where V is the wind velocity, c and k are the scale and shape parameters, respectively. The values of c and k were estimated to be 3.25 and 1.40, by processing wind data obtained.

3. Daily total of wind energy (E_d) calculated from wind data increased markedly with the increment of daily mean of wind velocity (\bar{V}_d).

The relationship between these parameters was represented by the equation

$$E_d = 0.0345 \bar{V}_d^{2.815} \quad \text{kWh/m}^2$$

The wind dependence of values of cubic factor (f_c) defined by Eq (8) was approximated by

$$f_c = 2.347 \bar{V}_d^{-0.185}$$

4. In taking into account the cut-in and cut-out wind velocity of wind electric generator, wind energy effective for the wind electric generator was evaluated by using wind data obtained in 1979 and 1980, and it was shown that the ratio of effective wind energy to total wind energy was about 0.66.

5. Monthly wind rose was obtained from continuous observation of ten-minute averaged wind direction.

During the period from December to March, north-west wind prevailed and south or south-east wind was hardly observed. In contrast, during the period from June to September, south-east or south wind prevailed but north-west or north wind was also frequently observed.

Daily fluctuation angle of wind direction was largest in August, and smallest in December, amounting to 270 and 120 degrees, respectively.