

# 風力発電

## Generation of Electricity by Wind Power

東 昭\*

Akira Azuma

### 1. 風の持つエネルギー

風は日光を受けた地表の非一様加熱から生ずる。地球に到達する毎秒の太陽エネルギー、すなわちパワーは  $1.73 \times 10^{14}$  kW, この中  $1/3$  は反射し、残りの  $1.13 \times 10^{14}$  kW が大気圏内に取込まれる。大気に突入したパワーの  $2\%$ ,  $2.2 \times 10^{12}$  kW が風を起すことに使われ<sup>1)</sup>, 年間を通じての風のエネルギーは,  $(1 \sim 9) \times 10^9$  MWh になるといわれている<sup>2,3)</sup>。したがって、若しこの中の  $1\%$  も取出せたら、人類の生活に必要なエネルギーは全て賅なえるとのことである。

さて、標準大気 ( $15^\circ\text{C}$ , 1 気圧, 密度  $\rho = 1.225$  (kg/m<sup>3</sup>)) 中で、速度  $V$  (m/s) の風が与える動圧 (風を完全にせき止めた時の単位面積当りの力)  $p$  は

$$p = \frac{1}{2} \rho V^2 = 0.6125 V^2 \quad (\text{N/m}^2) \quad (1)$$

したがって、その単位面積当りのパワー、 $P/S$ , は

$$P/S = \frac{1}{2} \rho V^3 = 0.6125 V^3 \quad (\text{W/m}^2) \quad (2)$$

与えられる。これは例えば同じ速度の水力のそれに比べて密度比である約  $1/820$  も小さい。図-1は、標準状態の地表における風の圧力とパワーとを、風速の函数として画いたものである。

このパワーを、風車で取出すことの出来る最大値は、いわゆる“ベッツの限界”として知られる  $\eta = 16/27 = 0.593$  が掛かった。

$$P_{\text{max}} = \frac{1}{2} \rho V^3 S \cdot \eta = 0.363 V^3 \quad (\text{W}) \quad (3)$$

与えられる<sup>4)</sup>。

実用風車では、効率  $\eta$  は、上のベッツの限界より低く、通常  $\eta = 0.3 \sim 0.4$  程度なので、それらの場合に、風車正面面積と風速とを変えて得られるパワーを示したのが図-2である。効率  $\eta$  は最大値  $0.593$  の他に  $0.4$  と  $0.3$

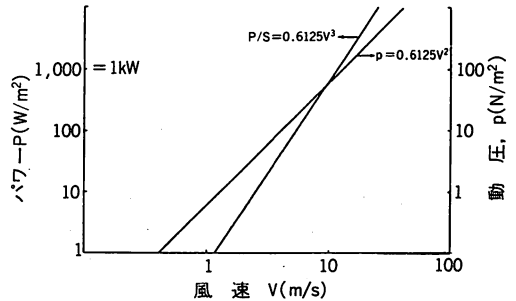


図-1 海面上における標準大気の風の持つ動圧とパワー

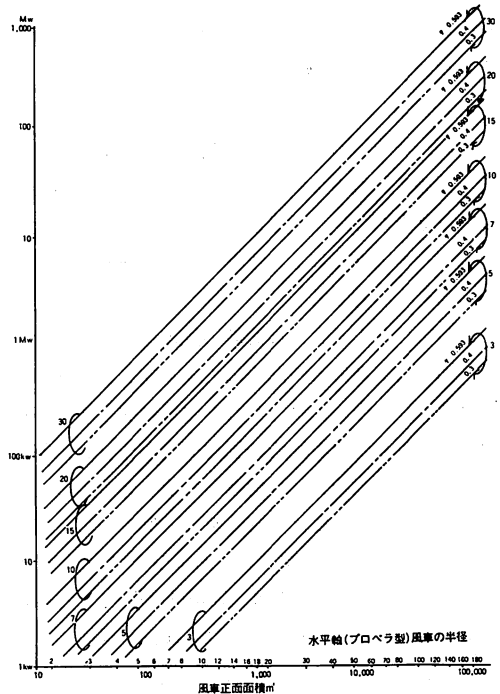


図-2 風車出力

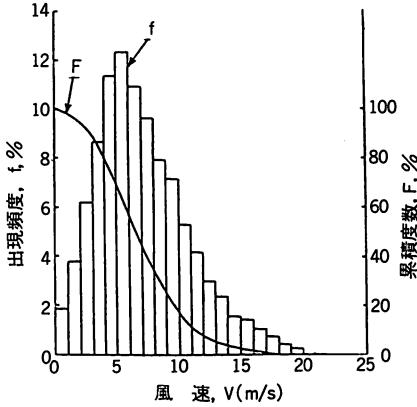
を例示した。

### 2. 風の変動

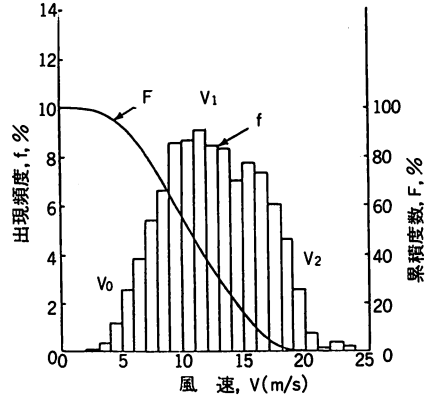
風は、一定の速さで、一定の方向から吹いて来る場合は稀である。一般に風速は、その速さも方向も、常

\* 東京大学工学部境界領域研究施設教授

〒 153 東京都目黒区駒場 4-6-1



(a) 風速



(b) パワー

図-3 風速およびそのパワーの出現頻度と相対累積度数の一例

に変動するものである。その変動の周期は、四季で変るゆっくりしたものから、昼夜で変る一日周期のもの、さらに時々刻々変る、いわゆる“乱れ”の秒あるいはそれ以下のオーダーのものまでである。

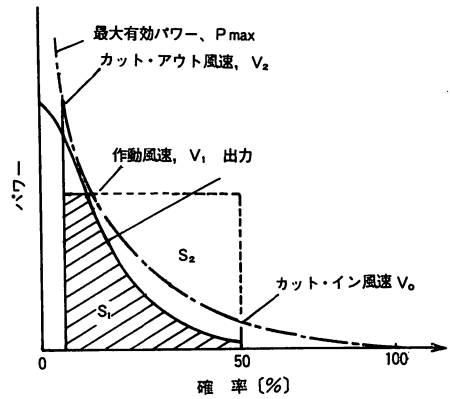
風車にとって、その回転速度や偏揺(方向変化の)角速度は、周波数で云って1 Hzといったオーダーのものが大部分であるから、日周変化以上の長周期変動は、定常風の変化と見做せる。

これに対して、風の乱れによる変動は、乱れの渦の直径が、風車の直径に比べて充分小さいもの、したがって極めて周波数の高いものは、騒音を考える時以外は余り意味がない。丁度風車の直径と同程度の大きさの渦が、その性能にも、また構造物の振動や疲労強度にも大きく影響する。

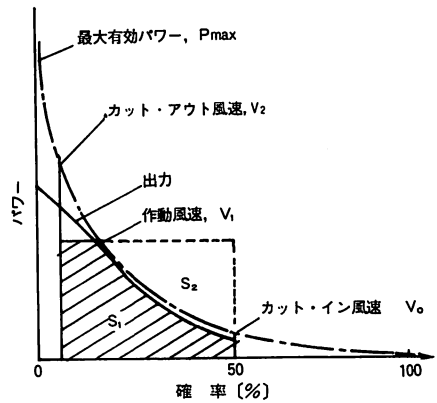
そのような大きさ、周波数の風の乱れは、したがって、局地的な地形と時間帯に大きく左右されるので、風車の設計に当っては、それをどこに建設するかが問題であり、その建設場所の風況調査が先行し、製作には、その結果への充分な配慮が必要である。

図-3は、風速の変化の統計値の一例を示したもので、1 m/s 毎に区別した風の速さおよびそのパワー(風速の3乗に比例)の出現頻度(確率密度函数)  $f$  と相対累積度数(確率函数)  $F$  とを何れも横軸を風速にとって%で示したものである。図-3 aの風速の密度函数形はワイブル(Weibull)分布で近似出来る<sup>5)</sup>。

風車を使うには、風速の出現頻度分布の高い所を用いるよりは、パワーの頻度の高い所が使えるようにした方が、エネルギー獲得のためには有効である。そこで最適作動風速  $V_1$ 、風車を作動せしめるカット・イン風速  $V_0$ 、および風車の作動を停止するカット・オフ風



(a) 高い作動速度



(b) 適切な作動速度

図-4 風車出力

速  $V_2$  は、図-3bに示されるように、このパワーが充分利用出来るような値に設定する。通常風車は、最適作動風速以上の風速で、出力が一定に保たれるように設計されている。

図-4 a, b 風速出力とその年間出現確率との関係を示したもので、式(3)で示された最大有効パワー  $P_{max}$  が鎖線で与えられ、また実用風車の出力が実線で示されている。図中の斜線面積  $S_1$  は、風車の得られるエネルギーに比例し、若し風車が常に  $V_1$  以上の風速、すなわち定格出力で稼動出来れば、図中の  $S_2$  を加えた、 $S_1 + S_2$  という四角形の面積に比例したエネルギーが得られる。比  $S_1 / (S_1 + S_2)$  は“出力比”で、風車の性能の目安となる。

そこで若し、(a) 作動風速をあまりにも高い値に選ぶと、得られるエネルギー  $S_1$  はパワーの大きい領域に広がるが、設計点から外れた、パワーの小さい領域での効率は落ち、出力比は悪くなる。これに対して、(b) 作動風速を適切な値に選ぶと、得られるエネルギー  $S_1$  の高出力域は減るが、低パワー域では高効率により増加し、出力比は良くなる。

2. いろいろな型の風車

風車にはいろいろな型があって、環境や用途に応じて使い分けられている。大きく次の2つの型に分類される：

(i) 水平軸風車, (ii) 垂直軸風車。

(i) 水平軸風車 (図-5)

回転軸が、ほぼ水平に配置された風車の代表的なものが(a)プロペラ型風車で、ブレードの翼特性が良い程(平滑に仕上げた程)、ブレード面積と円板面積との比である“ソリディティ”は小さい方が効率が低い。発電を目的とした大型風車に適している。

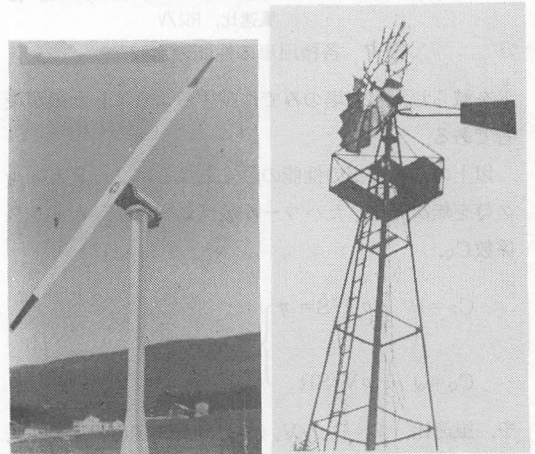
ブレード増を増して、ソリディティを上げたのが(b)のタービン型(バイシクル・ホイール型)風車で、効率は落ちるが、トルク係数が大きいので、小型の、例えば揚水ポンプの入力源等に用いられる。

水平軸型風車では、回転面を常に風に正対させる必要がある。そうしないと、性能低下を来たすばかりでなく、空気がブレードの回転面上の位置(アジマス角)により変動し、その根元の曲げモーメントのピーク値が著しく増大する。回転面を塔の風下側に配置すると、後流の影響で騒音や疲労に問題が出るし、また風上側に配置すると、風見用の安定板を必要とする。

(ii) 垂直軸型風車 (図-6)

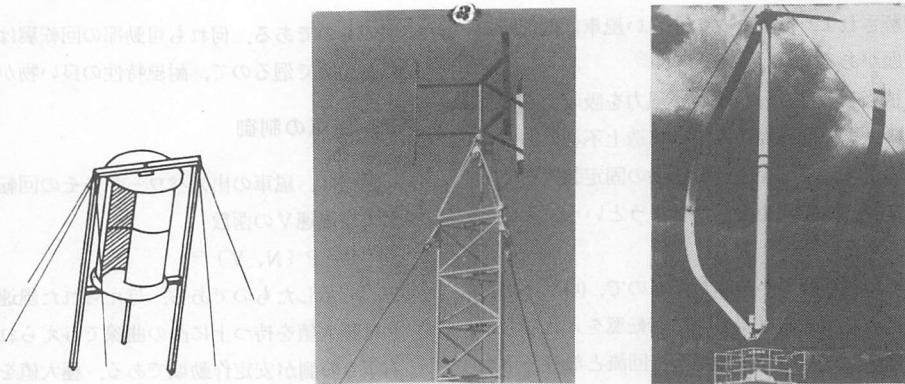
風の方向はどちらからでも良くなるので、起動トルクの小さい欠点があるにもかかわらず、利用されている。

(a)のサボニア型は、効率は悪いがトルクが大きくとれるので、やはり用水等に用いられる。これに対して、高効率のものは、ソリディティの小さい、(b)サイクロ・ジャイロ型(ジャイロ・ミル型)と、(c)ダリュウス型とがあって、前者のブレードにかかる曲げモーメント



(a) プロペラ型 (Mod-2), (b) タービン型 (バイシクル・ホイール型) ボーイング社製

図-5 水平軸型風車



(a) サボニア型

(b) サイクロ・ジャイロ型

(c) ダリュウス型

図-6 垂直軸型風車

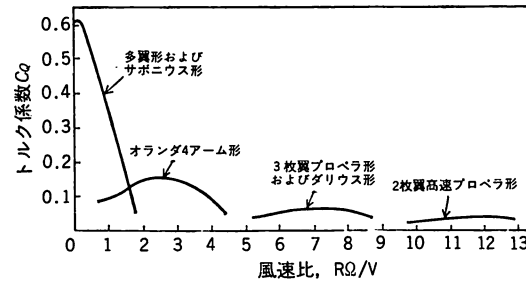
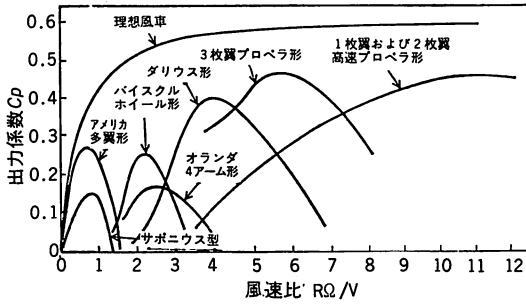


図-7 各種風車の性能の比較

トを減らし、張力場のみで作動するようにしたのが後者である。

以上の各種風車の性能の目安となるパワーPとトルクQを無次元化したパワー係数(効率η)C<sub>P</sub>とトルク係数C<sub>Q</sub>,

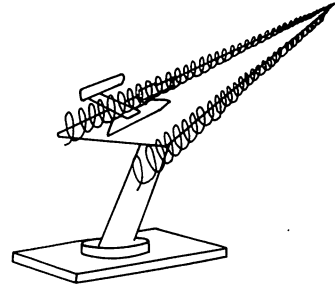
$$\left. \begin{aligned} C_P &= P / \frac{1}{2} \rho V^3 S = \eta \\ C_Q &= Q / \frac{1}{2} \rho V^2 S R \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

を、風速比、 $\lambda = R\Omega/V$  ( $\Omega$ は回転角速度、Rは回転翼半径)の函数として示したのが図-7である。

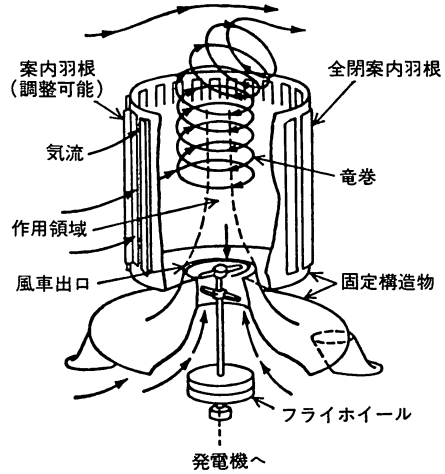
回転数、したがって先端速度R $\Omega$ を風速Vで割った風速比が小さい風車はトルクが大きくとれ、風速比の大きい風車は効率が良くなるが、トルクは小さいことが再び理解されよう。トルクの小さい風車は低速時の始動に問題がある。

単位面積当りのパワーが小さい風力を吸収するのに、可動部分の大きい回転翼のみでは構造上不利であるという考えの下に、風速を上げる補助の固定装置を使って小型のプロペラ型風車を働かせようという試みがある。

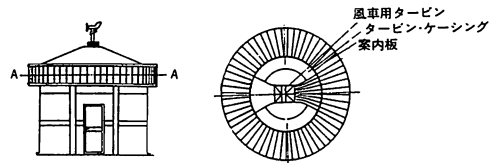
図-8はその例の幾つかを示したもので、(a)は三角翼の両翼端に近く出来る縦渦の中に回転翼を入れるもの、(b)は壱型のブレードを通った風が旋回流となり、下から高速の風を誘導するのを利用した竜巻型のもの、そして(c)は放射状の案内板で風を集める全方位増風速塔



(a) 三角翼の縦渦利用型



(b) 竜巻型風車(グラマン社)



(c) 全方位増風速型(琉球大学)

図-8 風速増強を計った風車

型のものである。何れも可動部の回転翼はパワーを集めた局所で廻るので、耐風特性の良い物が製作出来る。

### 3. 風車の制御

図-9は、風車の出力パワーPをその回転数N(rpm)および風速Vの函数

$$P = P(N, V) \quad (5)$$

として示したものである。与えられた風速に対して、Pは極大値を持つ上に凸の曲線と与えられるが、この右下りの側が安定作動域である。極大値を連ねた一点鎖線は、回転数Nの3乗に比例する。

風速の変動にかかわらず回転数を一定に保持するた

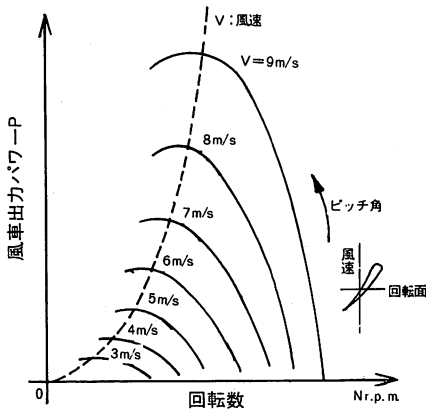


図-9 風車出力と風速および回転数との関係

めには負荷の制御を行うかまたはブレードのピッチを変えなくてはならない。図-9に矢印で示されているように、ブレードのピッチ角（風速の方向から測って回転面に近づく方向に正にとる）が大きくなって90°に近づくにつれてパワーは極大値に近づく。

#### 4. 発電システム

風車の特色として、前述のように、風を持つパワーが稀薄なので、装置が大型になることと、常に風速（風の速さと方向）に変動があるので、回転数やパワーを一定に保持することが容易でないということがある。このため、直接のパワーの利用よりは、一旦エネルギーとしてそれを蓄え、別にそれを取出すという方法が考えられ、長く利用されて来た。

例として、風車出力をポンプに連結し、それで水を汲んで、水の位置エネルギーとする方法、フライホイールを廻して、その運動エネルギーとして貯える方法、直流発電機を廻してバッテリーを充電する方法、発熱機と連結し、熱として貯える方法、等である。

これに対して出力として電気の交流を利用する場合には、直接の単独利用もあるが、大きい送電システムの中に一部混入させることが多い。何れにしろ、発電機に連結する場合には、それが一般に高速回転をする必要から、周速比の大きい風車の利用が普通である。

発電機には(a)直流発電機、(b)同期（交流）発電機および(c)誘導（非同期）発電機の3種がある。昔は小型風車発電に、専ら直流発電機が使われたが、今は直流への変換の容易な整流器の開発で、低い回転数でも効率が高いか、昇降圧の容易な同期または誘導発電機が普及している。但し、同期発電機は、一般用送電回路に連結する時には、回転数が正確に同期し、同一電圧

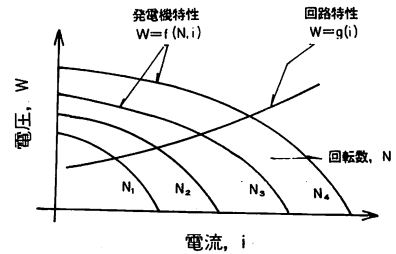


図-10 発電機および回路特性<sup>5)</sup>

にあることが要求される。これに対して誘導発電機は最も安価でかつ送電回路への連結は信頼性がある。

##### (i) 単独使用の場合

風車はある電圧下で電流を供給する発電機を駆動するが、その関係は図-10に示される。発電機の電圧Wはその回転数Nと取出される電流iとの函数として

$$W = f(N, i) \quad (6)$$

で与えられ、一方回路特性は

$$W = g(i) \quad (7)$$

で与えられるので、両函数の交点が作動点となる。必要なパワーPNはしたがって

$$P_N = W_i + \Delta P \quad (8)$$

で与えられる。ここにΔPはシステムの機械的損失等を含む。

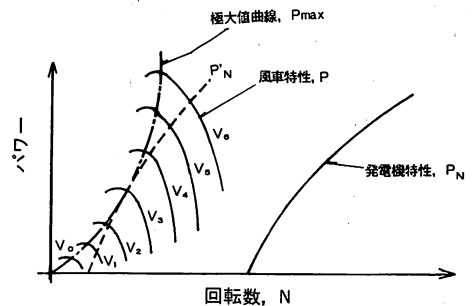


図-11 風車と発電機のマッチング<sup>5)</sup>

図-11には風車の供給するパワーPと、上記必要パワーPNとを回転数の函数として示した。ギャ比k（発電機の回転数/風車の回転数）で割った風車の回転数で示したPNは図-11にP'(N)として点線で与えられている。PとP'Nとの交点がマッチングした作動点で、得られる出力はギャ比をパラメータとして図-12に示される形となる。

##### (ii) 混入使用の場合

発電機の回転数が厳密に一定に保持される同期発電機の場合と、負荷に応じて若干変化する（滑りのある）(b)誘導発電機の場合とで異なり、図-13にはそれぞれ

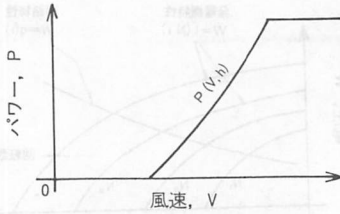


図-12 システム性能

実線と点線とで示されている。ギヤ比で割って回転数を修正した $P'_N$ と $P$ との交点が作動点である。ギヤ比を変えることで、その作動点を、最も使われる風の極大パワーの所に持って来ることが出来る。

発電機に要求される一定速度の回転は、風車では、風速の変動に応じて、ブレードのピッチ角を変えらるということに対応出来る。通常、空気力学的なブレーキと、回転軸への機械的ブレーキ装置も備えられる。

単独使用に対しては、回転速度の3乗に比例してパワーの増す発電機が用いられる。

5. 経済性

通産省のサンシャイン計画の一環として推進された100kW風力発電システム(東京電力・石川島播磨重工)を基に、風車の経済性を検討してみる。同風車は風力発電システムのパイロット・プラントとして、三宅島に建設された(図-14、表1)。

同プラントの建設費は3億3千万円、運転実績は、運転費が建設費の1.1%、設備利用率(=総発電電力量/定格出力・総時間)22.2%、年間発電量 $194 \times 10^3$  kWh、償却年数15年、年利率8%として、発電単価は198円/kWhであった。この価は初めてのパイロット・プラントとしてもかなり高めである。

100kW級として、これを安価にするには、結局は建

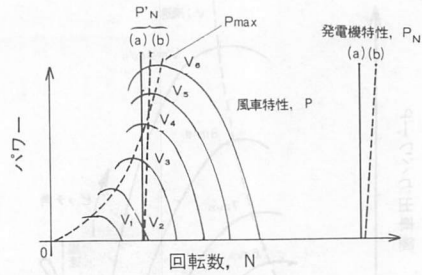


図-13 風車と同期および誘導発電機のマッチング<sup>5)</sup>

設費(特にブレードの製作費)を安価にすると共に、各部をモジュール化して量産体制をとることと、建設地と定格風速の見直しとで、設備利用率が上げれば、現電力価格に近づき、多分数10円/kWhとなり得る。

しかしより安価にするには、やはりシステムを大型化した、1MW級の風車開発である。表2は諸外国の



図-14 100kW級パイロットプラント(三宅島)

表1 100kW級風力発電システムの基本設計

分類	項目	方式・諸元	備考	分類	項目	方式・諸元	備考
1. 出力	定格出力	100kw	地上高28m	4. タワー	構造形式	スチールパイプトラス	
	風況条件	カットイン風速約5m/S 定格風速 10m/S カットアウト風速17m/S 耐風速(瞬間最大)68.2m/S			ハブ高さ	28m	
2. ロータ	配置方式	Down-Wind	定格回転数 ×120%	5. 発電装置 発電機	発電方式	DCリンク他励インバータ方式	
	ブレード枚数	2枚			方式	交流同期式	
	直径	29.4m			定格	100kw	
	定格回転数	51rpm			回転数	1500rpm(最大1800rpm 許容)	
3. ブレード	許容最大回転数	62.2rpm	6. 運転制御	7. 計測システム	電圧	101±6V	発電出力 制御併用
	回転方向	(風上側から見て)反時計方向			周波数	50±0.2Hz	
3. ブレード	制御方式	可変ピッチ方式	7. 計測システム	データ収集処理	コンピュータ方式		
	長さ	12.5m					
3. ブレード	材料	GFRP製					
	翼型	NACA44シリーズ					

表2 諸外国の代表的プラントの仕様

モデル名	DAF	MPI -200	MOD -OA	HAT -25	NIBE -A, B	MOD-1	TVIND	MOD-2	Bendlx	GROW IAN	MONO PTEROS	VOITH WEC520	DEBRA -25	WTS-3	WTS-4	KMW	HWP -300	MOD -5A	MOD -5B	EOLE
国名	カナダ	アメリカ	アメリカ	オランダ	デンマーク	アメリカ	デンマーク	アメリカ	アメリカ	西ドイツ	西ドイツ	西ドイツ	西ドイツ	スウェーデン	アメリカ	スウェーデン	イギリス	アメリカ	アメリカ	カナダ
定格出力 (KW)	200	200	200	300	630	2,000	2,000	2,500	3,000	3,000	370	270	30/100	3,000	4,000	2,000	300	7,300	3,200	3,800
ロータ配置 (V-axis)		Up	Down	Down	Up	Down	Down	Up	Up	Down	Down	Down	Down	Down	Down	Up	Up	Down	Up	(V-axis)
ロータ枚数	2	2	2	2	3	2	3	2	3	2	1	2	3	2	2	2	3	2	2	2
ロータ直径 (m)	24	26	41.2	25	40	66	54	100	50	100.4	48	52	25	77.6	78	75	22	121	98	63
ロータ回転数 (rpm)	38	30	40	80	34	35	32~42	17.5		18.5	44	37	33/55	25	30	25	45			14.3
ハブ高さ (m)	(37)	26	32.8	22	45	46	53	66	37	100	50	30	22.7	80	80	85		76	61	(96)
カットイン (m/s)		3.6	4.25	6	5	5	5	6.3	8	6.3	5.7		3.4	6	6.7	6	5	6.3	4.9	4.4
定格風速 (m/s)	10	12.5	10	13	13	10	14.8	12.3	18	11.8	10.0		6.5/10.5	13.5	15.6	12.5	13.5	14.3	11.6	20.4
カットアウト 風速 (m/s)		18	18	17	25	15.6		20.1		24	16		20	22.3	27	21	25	26.8	26.8	27
増速機	ベルト	平行軸 歯車	平行軸 歯車		平行軸 歯車	平行軸 歯車	遊星	遊星		遊星	平行軸		平行軸	遊星	遊星	遊星	平行軸			
増速比	1:18	1:40	1:45	1:20	1:45	1:51	1:183	1:103		1:81	1:34	1:1.12 1:9.82	1:30	1:60	1:60		1:34.3			
発電機定格 誘導電動機	同期	同期	同期	直流	非同期	同期	同期	同期	同期	非同期	同期	同期	誘導	同期	同期	非同期	同期			
発電機定格	225KV	250 KVA	250× KVA	400 KWDC	630 KVA	1,875 KVA	2,000 KVA	3,125 KVA		454 KVA				3,750 KVA	4,000 KVA	2,400 KVA	420 KVA			
タワー方式		スチール トラス	パイプ トラス	スチール チューブ	コンクリート	パイプ トラス	コンクリート	スチール チューブ (ソフト タワー)	スチール トラス	ポール +ステー	スチール シェル	スチール チューブ	スチール チューブ	スチール チューブ (ソフト タワー)	スチール シェル	コンクリート	スチール チューブ	スチール チューブ	スチール チューブ	スチール チューブ
ロータ重量 (TON)			1.06×2	1.12	3.37	38.5	4×3	77		240(含 ナセル)			3	23.5	59.4	75	3			
総重量 (TON)			40			297		283					14.5		269	205(タワー 除く)		769	413	
製作費		\$1,000 /KW	\$1.61M		\$1.33M	\$5.40M		\$3.37M												
運転時間	1977~	1978~	1978~	1981~	1980~	1980~	1978~	1981~	1979~	1982~	1981~	1981~	1983~	1981~	1982~	1982~	1984~	1985~	1985~	1985~

(「大型風力発電システム開発」成果報告書(三菱総合研究所)より)

代表的プラントの仕様一覧である。

建設費の低減は先ず重量を減らすことで、単位重量当りの発電量を5~10kW/tにすることが望ましい(パイロット・プラントでは1kW/t以下)。これで建設費が(10~5)万円/kW当りに出来れば、発電単価は30円/kwhを切るものと思われる。

## 6. 問題点

大型風力発電システム開発のための問題点を上げてみよう。

(i) 肌理細かい計算とモデル実験とで、風況に合致したブレード、ハブ、タワーの設計

(ii) 長尺のブレードを安価に作るためにポリエステル系の樹脂を使った(オートクレーブを使わない)FRP製のブレード製作技術の開発

(iii) システム全体の簡素化, モジュール化と, 量産化の促進

(i)で大事なことは、風況が場所により異なるため、特に乱れの激しい我国の風況下では、風速変動(特に

風向の変動)に伴うブレードの変動曲げモーメントが、その疲労特性に著しく影響することに注意する必要がある。

次に周りの環境に及ぼす影響として問題になるのは、(i)騒音と低周波振動および、(ii)電波障害であろう。

## 参考文献

- 1) Anon.: Energy from the Wind. World. Meteorological Organization, TN4, 1954
- 2) Garate, J. A.: Wind Energy Mission Analysis. Executive Summary. General Electric Co., U. S. ERDA Contract No. EY-76-C-OZ-2578, 1977
- 3) Coty, U. A.: Wind Energy Mission Analysis. Final Report, Lockheed-California, U. S. ERDA Contract No. AT-01-3-1075, 1976
- 4) Le Gourieres, D.: Wind Power Plants, Theory and Design. Pergamon Press, Oxford, 1982
- 5) Hennessey, J. P., Jr.: Some Aspects of Wind Power Statistics. Journal of Applied Meteorology, Vol. 16, No. 2, February 1977, pp. 119~128

## 海外行事案内

### ・代替エネルギー源に関する第7回マイアミ国際会議

(Alternative Energy Sources 7th Miami International Conference)

<会 期> 1985年12月9日-11日  
 <会 場> マイアミビーチ(フロリダ)  
 <主 催> マイアミ大学, クリーンエネルギー研究所

最初は1984年12月10-12日に予定されていたのが、都合により1年間延期された会議です。

### ・第13回エネルギー技術年次研究会と展示会

(Energy Technology 13th Annual Conference & Exposition)

<会 期> 1986年3月17日-19日  
 <会 場> シェラトン・ワシントン・ホテル(ワシントンD.C.)  
 <主 催> アメリカ ガス協会ほか15団体

尚、各行事について詳細がわかり次第改めてご案内します。